

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA MAÎTRISE EN PHYSIQUE

PAR
GHISLAIN ST-YVES

SUR LA RÉALITÉ DES MONDES DANS L'INTERPRÉTATION D'EVERETT DE LA
MÉCANIQUE QUANTIQUE

NOVEMBRE 2007

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

Remerciements

Je tiens d'abord à remercier Simon Lévesque pour toutes les discussions animées sur l'interprétation de la mécanique quantique qui m'ont souvent forcé à réviser et/ou à préciser mes arguments. Je remercie aussi Louis Marchildon pour sa disponibilité et sa flexibilité m'ayant donné la possibilité d'effectuer ces recherches très enrichissantes autant du point de vue philosophique que physique. Un merci particulier pour M. Adel Antippa dont la dévotion envers la physique et les encouragements m'ont beaucoup inspiré tout au long de mes études. Finalement, à tous ceux qui ont subi mes explications et dissertations scientifiques et philosophiques, merci de votre écoute.

Dans un tout autre ordre d'idées, je voudrais signaler quelques ouvrages qui ont été un point tournant dans ma compréhension des problèmes fondamentaux de la physique moderne. Premièrement, le livre "Philosophical Problems of Quantum Physics" d'Heisenberg a très certainement été un point tournant dans ma compréhension de l'interprétation de Copenhague et, de façon plus importante encore, du positivisme logique. Deuxièmement, "The Theory of Relativity" de David Bohm m'a aussi permis de faire un grand bond en avant dans ma conception du positivisme et de la nature des théories physique. Ces deux livres sont largement cités, puisque la majeure partie de leur contenu ne peut simplement pas être améliorée ou clarifiée. J'en suggère la lecture à tous ceux intéressés aux problèmes fondamentaux en science.

Table des matières

Résumé	i
Remerciements	ii
1 Problématique	1
1.1 Les succès de la mécanique quantique	1
1.2 L'observation comme loi de la nature	2
1.3 Deuxième problème : l'exotisme des états quantiques	3
1.4 Mesure et enchevêtrement	6
1.5 Recherche de solutions	8
2 L'interprétation de Copenhague	10
2.1 La validité de la description classique	10
2.2 L'objectivité de la description quantique	12
2.3 L'universalité de la description quantique	15
3 L'interprétation d'Everett	17
3.1 Les états relatifs à la base de la structure de l'observation	17
3.2 Le programme de la décohérence et l'interprétation existentielle	20
4 Le contre exemple de la mécanique bohmienne	26
4.1 Les bases de la reformulation bohmienne	26
4.2 L'étrange non-localité du potentiel quantique	28
4.3 Pourquoi l'interprétation bohmienne perdrait-elle ?	30
5 L'observateur dans les lois de la nature	34
5.1 Sur la nature des théories physiques	34
5.2 La description de la mesure dans les théories physiques	39
5.3 Le parallélisme psycho-physique en mécanique quantique	42

6	Application du positivisme logique	47
6.1	L'objectivité du positivisme	47
6.2	Le positivisme logique vs. les mondes de l'interprétation d'Everett	51
6.3	Copenhague vs. Everett	53
7	Conclusion	56
	Appendice A	59
	Appendice B	63
	Bibliographie	65

Table des figures

5.1	Représentation schématique de trois types de recouvrement entre deux théo- ries	36
5.2	Relation entre différents systèmes corrélés	40
5.3	Le parallélisme psycho-physique	42
5.4	Le parallélisme quanta-classique et psycho-physique	44

There is a theory which states that if ever anyone discovers exactly what the Universe is for and why it is here, it will instantly disappear and be replaced by something even more bizarre and inexplicable.

—Douglas Adams

Chapitre 1

Problématique

1.1 Les succès de la mécanique quantique

La mécanique quantique est une des théories dont les prédictions expérimentales ont été les mieux vérifiées. Elle est l'aboutissement d'une convergence de résultats théoriques et expérimentaux. Tout d'abord, elle fut nécessaire pour expliquer l'étrange stabilité de la matière connue qui défiait les lois de la mécanique classique. L'introduction d'un quantum d'énergie explique convenablement la forme empirique du spectre de radiation du corps noir et la discrétisation des raies spectrales. Il explique aussi certains phénomènes de seuil comme l'effet photoélectrique qui a valu le prix Nobel à Albert Einstein. Mais le véritable succès d'une théorie ne se mesure pas tant aux résultats qu'elle reproduit qu'aux résultats inattendus qu'elle prédit. Et encore une fois, même dans les situations les plus exotiques, la mécanique quantique n'a encore jamais été prise en défaut. Elle a prédit correctement l'effet tunnel (qu'une particule a toujours une probabilité finie de passer à travers une barrière de potentiel aussi élevée soit-elle). La théorie quantique relativiste de l'électron a permis l'incroyable prédiction de l'existence du positron, ou anti-électron. Plus récemment, la vérification expérimentale des corrélations à distance quantiques a encore confirmé la théorie. Les applications technologiques reposant sur ces succès sont aussi innombrables. On n'a qu'à penser au laser, aux ordinateurs et à la nanotechnologie. Comme toute grande révolution scientifique, la révolution quantique implique l'unification de deux phénomènes qui étaient auparavant compris comme distincts. La nature corpusculaire de la matière pouvait difficilement être réconciliée avec le comportement ondulatoire de la lumière. L'unification quantique a montré que la lumière et la matière étaient à la fois particules et ondes et que leur comportement spécifique pouvait être mis en évidence dans les bonnes situations expérimentales telles que les fascinantes expériences d'interférence de matière (les franges de Young) ou l'effet photoélectrique de la lumière.

1.2 L'observation comme loi de la nature

Cependant, malgré toutes ces réussites expérimentales, il semble que l'unification des phénomènes ondulatoires et corpusculaires nécessite une distinction radicale entre l'observateur et l'objet observé dans la description physique de la nature. Cette division est opposée à toute conception classique, où la description donnée est celle de la chose elle-même, indépendante, que l'observation ne fait que révéler subjectivement. Ceci implique qu'il n'est nullement nécessaire d'avoir des postulats sur l'observation, seulement des postulats sur ce qui *est*. Cette réalité indépendante est alors conçue comme une description pouvant implicitement englober l'observateur lui-même. En d'autres termes, tous les processus physiques, même ceux de mesure et d'observation, peuvent être imaginés indépendamment de l'observateur. C'est ce que nous voulons dire lorsque l'on parle de l'idéal de l'observateur détaché [14, p. 8]. Il est détaché au sens où il peut être conçu indépendamment, et il en va de même pour les systèmes observés. La situation est différente en mécanique quantique. Premièrement, la portion dynamique¹ de la théorie ne fait que des prédictions d'ordre statistique à propos de la valeur future des observables et la mesure de certaines observables au delà d'une certaine précision est irrémédiablement exclue par la mesure de certaines autres, dites conjuguées. Mais aucune mesure à aucune précision n'est exclue *a priori*. Dans la conception classique de l'observateur détaché, l'état de l'observateur supervient sur ce qui est². Cependant, dans la description quantique, il semble que ce qui *est* peut être choisi (dans les limites des statistiques). Par exemple, la mesure de l'impulsion montre un résultat assez bien défini qui exclut alors toute connaissance de la position au delà de la limitation du principe d'incertitude d'Heisenberg. Cependant, la mesure de la position aurait bien pu être effectuée en premier lieu et l'impulsion aurait alors été incertaine³. Alors comment l'observateur peut-il supervenir sur ce qui n'est pas observé : son état microscopique ? Cette première question a vraiment à voir avec l'objectivité de la description. Comment une description peut-elle être objective si nous avons un choix quant à ce qui peut être observé et ce qui ne peut l'être. De cette erreur a sans doute émergé l'idée que la description quantique

¹Nous reviendrons plus loin sur ce que cela veut dire.

²La supervenience est un terme assez récent qui implique une dépendance directe dans la phénoménologie des niveaux de description d'un même objet ou sujet. Par exemple, le parallélisme psycho-physique assume que les propriétés mentales (psycho) sont une conséquence directe des propriétés physiques. Le psychique (état mental) supervient sur le physique.

³Au sens prédictif. Nous considérons que ces concepts ont une réalité au sens où ils permettent de prédire l'état futur d'un système. L'incertitude sur un concept, qu'elle soit conceptuelle ou opérationnelle, est une limitation sur les prédictions futures.

devait plutôt décrire l'information que nous avons de la nature. Il n'y a après tout aucun paradoxe à posséder seulement une information subjective partielle à propos d'un message. Cependant, les problèmes de cette conception apparaissent rapidement : l'information à propos de quoi (quel est le messenger du message) et quelle est la source de cette limitation sur notre connaissance ? Il doit y avoir quelque chose qui se comporte de manière aussi étrange que la théorie semble le laisser croire : la nature détient toute l'information ! Les physiciens purement instrumentalistes ou opérationalistes argumenteront que la mécanique quantique est seulement vraiment applicable dans des situations de laboratoire contrôlées où tous les postulats de mesure sont respectés rigoureusement, mais cela diminue certainement l'importance théorique que la mécanique quantique a même en dehors des laboratoires. Par exemple, personne ne doute que la lumière qui s'échappe d'une étoile lointaine est vraiment seulement émise à certaines fréquences bien précises qui correspondent aux raies d'émission de l'hydrogène, de l'hélium, etc. Aucune préparation de mesure n'a été faite et on conçoit que ces fréquences soient factuelles même en dehors de l'observation. Nous pourrions poursuivre longtemps sur cette question mais le point primordial est déjà établi : comment concevoir objectivement une théorie fondamentale faisant intervenir l'observateur et la mesure dans ses postulats ?

1.3 Deuxième problème : l'exoticité des états quantiques

Le deuxième problème se rapporte à la linéarité de l'équation de Schrödinger. Nous avons amplement répété que cette équation fournit la bonne quantification pour tous les systèmes simples que nous avons pu analyser. La théorie, comme elle tient présentement, maintient que l'équation est valide pour tout système, aussi complexe soit-il. Cela a des conséquences majeures lorsque l'on tente de décrire le processus de mesure à l'intérieur du formalisme. L'équation de Schrödinger implique une évolution linéaire de l'état, c.-à-d. que l'évolution de la combinaison linéaire de deux ou plusieurs états est égale à la combinaison de ces évolutions comme si elles étaient prises individuellement. Ceci implique qu'aucune des composantes d'un état n'est supprimée ou perdue au fil de l'évolution. Le problème est que l'espace représentant les états quantiques possibles est beaucoup plus vaste que le sous-espace représentant des états quasi-classiques. De ce fait, lorsque l'on tente de décrire des objets macroscopiques se comportant, selon toute vraisemblance, comme des objets classiques, nous devons expliquer pourquoi tous les états de superposition d'observables apparaissent comme interdits ou inadéquats puisqu'ils ne le sont pas selon les principes de la mécanique quantique *a priori*.

Dans la manière standard de concevoir une expérience quantique, la préparation d'état et la mesure sont essentiellement le même processus. Le premier peut être vu comme un filtre où on laisse passer seulement une classe spéciale d'objets qui ont les propriétés recherchées par cette préparation d'état, tandis que la mesure est plutôt une question du genre : par quel filtre tel système est-il passé ? Chaque série de filtres est donc une question que l'on pose au système dans les limites de précision que ces filtres peuvent offrir. Par analogie avec la lumière, imaginons que nous ayons un filtre qui laisse seulement passer le bleu tandis que toutes les autres couleurs seraient absorbées. Dans ce cas, peu importe la combinaison initiale de couleurs, l'état final après le filtre sera bleu et pour les fins pratiques de l'expérience, on peut oublier ce qui se passe pour toutes les autres couleurs absorbées. Qu'elles engendrent des changements dans l'état du filtre ou qu'elles soient réfléchies et continuent en perturbant un autre système d'une quelconque manière n'est pas vraiment de notre ressort ici, car nous sommes seulement intéressés à l'évolution future de notre expérience. Donc à toutes fins pratiques, nous pouvons changer l'état initial qui était quelque chose du genre

$$|\phi_{\text{ini}}\rangle = c_{\text{rouge}}|\text{rouge}\rangle + c_{\text{bleu}}|\text{bleu}\rangle + \dots + c_{\text{vert}}|\text{vert}\rangle \quad (1.1)$$

en l'état simplifié $|\phi_{\text{fin}}\rangle = |\text{bleu}\rangle$ car maintenant, on sait avec certitude que l'état de notre système après le filtre est bleu et on peut le vérifier en montrant que tous les systèmes préparés dans cet état passeront un deuxième filtre bleu avec une probabilité de 1. Comme nous avons dit, la mesure est essentiellement le même processus. Par conséquent, après une mesure (c.-à-d. lorsque l'on sait par quel filtre un système est passé) on doit changer l'état du système en l'état qui avait une certitude de passer à travers le filtre où il est passé. La raison est encore que l'on s'intéresse seulement à l'évolution future à partir de ce point. Ce changement est définitivement non linéaire car certaines composantes qui auraient pu continuer leur évolution sont de toute évidence détruites dans nos considérations théoriques. Qu'elles doivent "réellement" être détruites du point de vue de la nature est une autre question à laquelle nous devons nous adresser plus loin. Dans la description de von Neumann-Dirac, les composantes filtrées sont effectivement irrémédiablement détruites et on appelle ce processus "effondrement". Cet effondrement explique en un certain sens pourquoi des superpositions ne sont jamais observées : elles sont détruites lors de la mesure. Cependant, cette description a pour inconvénient majeur d'être fondamentalement subjective dans son application. La raison est assez simple. Supposons que nous ayons un système microscopique dans un état $|\Psi\rangle$ qui est une combinaison linéaire de deux ou plusieurs parties qui peuvent évoluer en des termes se recoupant sur un même sous-espace de

l'espace de Hilbert du système. Dans une telle situation, il y a alors possibilité d'interférence complexe entre les termes de la superposition. Cette interférence implique justement que l'on ne peut pas dire que l'état du système était une des composantes de la superposition à quelque moment précédant l'interférence : il doit être dans l'intervalle de toutes les valeurs possibles à la fois. Lorsque l'on effectue une mesure, disons de l'observable \mathcal{A} , on obtient une valeur précise et on applique le postulat d'effondrement. Cependant, du point de vue de la mécanique quantique, la mesure n'est qu'une interaction entre un sous-système et un autre et peut aussi être décrite par un vecteur d'état. Nous savons qu'un système de deux particules doit être traité comme une seule entité dite enchevêtrée : c'est la caractéristique holistique de la mécanique quantique. Il n'y a jusqu'à maintenant aucune raison de douter, outre le fait que les objets macroscopiques n'ont jamais été observés en superposition (et que l'on ne sache même pas si cela fait un sens de dire que l'on peut observer une superposition), que cette règle s'étend à tous les systèmes composés. Donc lorsqu'il y a interaction entre deux sous-systèmes, si un effondrement avait effectivement eu lieu dans la base de l'observable \mathcal{A} , il serait impossible d'observer de l'interférence pour $\mathcal{A} \otimes \mathcal{B}_{\mathcal{A}}$ où $\mathcal{B}_{\mathcal{A}}$ est une observable du deuxième système corrélée à l'observable \mathcal{A} du premier. Mais nous le pouvons dans les cas simples et dans certains cas un peu plus compliqués. Il semble donc que, peu importe la complexité, il faut garder en tête la possibilité de devoir reculer la frontière de l'effondrement encore plus loin dans la chaîne de corrélation. Ce fait a été initialement reconnu par von Neumann lui-même qui écrit

[...] no matter how far we calculate – to the mercury vessel, to the scale of the thermometer, to the retina, or into the brain, at some time we must say : and this is perceived by the observer. That is, we must always divide the world into two parts, the one being the observed system, the other the observer. In the former, we can follow up all physical process (in principle at least) arbitrarily precisely. In the latter, this is meaningless. The boundary between the two is arbitrary to a very large extent. [46, p. 419]

Ce fait est pour le moins troublant : est-ce que l'effondrement doit être compris comme un processus physique ou comme une loi métaphysique due à la nature de l'observateur et à une relation spécifique par rapport à la matière observée ? Il intervient seulement dans l'analyse de l'observateur conscient, il ne peut être situé ni localement, ni temporellement puisque la division entre observateur et observé doit être mobile. Aussi, von Neumann insiste sur l'importance du parallélisme psycho-physique dans la description de la nature où les résultats de mesure se présentent toujours sous la forme “[...] an observer has made a certain (subjective) observation ; and never any like this : a physical quantity has a certain value. [46, p. 420]”. La question de l'objectivité de la description revient encore à l'avant-scène.

Un deuxième problème plus terre à terre avec l'effondrement (vu comme objectif) se

rapporte à son application directe. Puisque la mécanique quantique est holistique et qu'un vecteur d'état localisé dans l'espace de Hilbert peut décrire un système de particules enchevêtrées très éloignées spatialement, un changement du vecteur d'état à un temps spécifie un référentiel privilégié dans lequel l'effondrement a lieu (celui dans lequel la configuration est modifiée instantanément). L'idée d'un changement de configuration instantané est de toute évidence en opposition avec l'idée d'invariance des lois physiques de la théorie de la relativité. Ce genre d'effondrement ne peut pas être invariant dans une transformation de Lorentz. Différents observateurs se retrouvent donc à attribuer différentes réalités à de "mêmes" événements (voir par exemple d'Espagnat [15, p. 209]).

1.4 Mesure et enchevêtrement

En n'acceptant pas cette solution incommode, on se retrouve avec des étrangetés comme le chat de Schrödinger et l'ami de Wigner, c-à-d que nous n'avons pas une description quantique de faits objectifs. Les problèmes que rencontre la mécanique quantique sont synthétisés dans ce qu'il est convenu d'appeler le *problème de la mesure* (PM). Ce problème émerge essentiellement comme une conséquence des deux propriétés fondamentales de la représentation de l'état en mécanique quantique : le principe de superposition et l'enchevêtrement des systèmes. Ces propriétés n'ont pas d'équivalent dans les théories classiques, ce qui rend l'intuition des phénomènes difficile, voire trompeuse. Heureusement, l'étude du problème de la mesure ne nécessite pas, a priori, toutes les complications d'une version plus avancée de la théorie quantique, telle que la théorie quantique relativiste des champs, puisque la formulation du problème repose sur les deux principes que nous avons mentionnés. Ceux-ci étant intrinsèques à toute formulation de la théorie quantique, nous choisirons, comme plusieurs autres l'ont fait, le contexte simplifié de la mécanique quantique non relativiste.

Dans cette optique, le problème de la mesure peut être formulé de la manière suivante :

Problème de la Mesure (PM) *Comment expliquer que, bien que l'état d'un système quantique puisse être représenté par une superposition de vecteurs propres d'une observable, la mesure de cette observable donne toujours, ou apparaît comme, un résultat unique et défini ?*

Dans la formulation précédente, l'exigence d'obtenir un résultat unique et défini à la fin du processus de mesure est seulement motivée par le point de vue classique que nous

avons de la nature. Le fait que nous observons toujours des objets physiques ayant des positions et impulsions bien définies (dans une certaine limite de précision ultimement donnée par nos sens) est déjà un résultat expérimental en soi pouvant servir à falsifier une théorie. D'ailleurs, on peut préférer voir ce fait comme étant une preuve que la mécanique quantique est en conflit sérieux avec la réalité [35, p. 298] puisque le principe de superposition n'est pas représenté macroscopiquement. Si la mécanique quantique prétend être une théorie plus fondamentale que la mécanique classique, alors cette dernière devrait sans doute être retrouvée comme un cas limite dans certaines conditions. Cependant, cette limite entre les niveaux classique et quantique s'avère être particulièrement intangible. Qu'entend-on par classique ou macroscopique ? Il est évident que ce n'est pas seulement une question de grandeur car des superpositions quantiques peuvent être soutenues sur de très grandes distances. Le nombre de particules d'un système pourrait être utile mais n'est certainement pas suffisant. Il semble qu'avec la progression de la technologie, on arrive à mieux isoler des systèmes de plusieurs particules et des phénomènes typiquement quantiques sont toujours observables. L'enchevêtrement interne et la complexité de l'état pourraient sans doute se rapprocher de ce que l'on conçoit lorsque l'on pense à un objet macroscopique (voir par exemple Leggett [32, p. 425]). De même, le fait qu'un objet perturbe grandement son environnement est certainement garant de sa macroscopicité et de la difficulté d'observer des phénomènes typiquement quantiques. Lorsque l'on conçoit une expérience quantique macroscopique, les conditions d'interaction avec l'environnement doivent être extrêmement contrôlées. C'est d'ailleurs pourquoi les phénomènes quantiques mésoscopiques sont seulement observables à des températures près du zéro absolu, là où les interactions non spécifiques sont minimales. La compréhension de cette "frontière" entre classique et quantique est certainement une partie importante d'une réponse au PM et devra être étudiée attentivement.

Les conflits entre superposition et résultat unique semblent apparents dans la formulation de PM. Cependant, l'importance du principe d'enchevêtrement y est beaucoup moins évidente. L'enchevêtrement a été perçu par Schrödinger comme étant *la* caractéristique nouvelle de la mécanique quantique [5, p. 202] et en effet, son implication dans le PM est fondamentale. Pour le mettre en évidence, nous allons décrire mathématiquement un exemple trivial. Supposons que nous ayons un système S dans un état de superposition $|\Phi^S\rangle = \sum_i c_i |\phi_i\rangle$ où $\mathcal{A}|\phi_i\rangle = a_i |\phi_i\rangle$ et où \mathcal{A} est l'observable que nous allons mesurer à l'aide de l'appareil de mesure M . Même si cela est irréaliste pour plusieurs raisons, nous supposons, par souci de simplicité, que l'état initial de l'appareil est un état pur⁴

⁴von Neumann [46, p. 437] démontre qu'il n'y a pas de sursimplification nuisible à concevoir une connaissance complète de l'observateur (appareil de mesure dans notre cas).

$\psi^M = \langle q | \psi_0(t_0) \rangle = \psi_0(q, t_0)$ où le paramètre q représente le centre de masse du pointeur de l'appareil, qui est initialement centré autour de la valeur zéro. Dans ce cas, une interaction de mesure convenable (par exemple $\mathcal{H}_{\text{int}} = -g(t)\mathcal{A} \otimes \mathcal{P}$ où $\int_{t_0}^{t_f} g(t)dt = \tau$ et $[\mathcal{Q}, \mathcal{P}] = i\hbar$) produira une délocalisation du centre de masse du pointeur proportionnelle à la valeur de \mathcal{A} multipliée par τ (voir par exemple [14, p. 143]). Cependant, la valeur de \mathcal{A} n'est pas définie uniquement initialement et ainsi, nous obtenons après l'interaction

$$|\psi_0(t_0)\rangle \otimes \sum_i c_i |\phi_i\rangle \rightarrow \sum_i c_i |\psi_i(t_f)\rangle \otimes |\phi_i\rangle \quad (1.2)$$

La superposition du système s'est étendue au système global $S + M$ et la valeur du centre de masse du pointeur, une observable "macroscopique" serait elle aussi dans un état indéfini. On voit bien ici où l'enchevêtrement est entré dans le problème avec la notation du produit tensoriel \otimes . Après la mesure, aucune valeur objective du centre de masse ne peut être établie indépendamment de la valeur de l'observable \mathcal{A} et réciproquement. Cependant, il est clair que l'opération de mesure a vraiment fait ce que l'on attendait d'elle au sens où une corrélation très spécifique associe maintenant S et M . Si, par un second processus (qui serait différent d'une interaction quantique), on trouve que M est en fait dans l'état $|\psi_j(t_f)\rangle$, alors on peut inférer avec certitude que le système S est dans l'état propre $|\phi_j\rangle$ associé à la valeur propre a_j (telle qu'indiquée par l'appareil). De plus, il est clair qu'aucune résolution de cet enchevêtrement ne peut provenir d'une autre interaction avec un système quantique car toute autre évolution unitaire et linéaire (équation de Schrödinger) ne pourra qu'étendre l'enchevêtrement. La particularité non classique de l'enchevêtrement (par rapport à une simple corrélation) est qu'il implique une forme d'holisme dans la description des phénomènes. Ainsi, aucune propriété d'un sous-système ne peut être décrite localement indépendamment de l'état des autres. C'est justement une des composantes du problème de la mesure de retrouver des valeurs objectives aux observables macroscopiques d'un sous-système indépendamment des parties éloignées du système comme le suggéreraient les théories classiques (où les objets possèdent des propriétés en soi). Face à ce problème, plusieurs tentatives de solutions peuvent être abordées. L'objectif de la prochaine section est de mettre en contexte l'interprétation qui sera considérée plus en détail.

1.5 Recherche de solutions

Les principales tentatives de solution du problème de la mesure peuvent être classées en quatre catégories :

1. Les interprétations instrumentalistes, opérationnelles ou épistémiques. L'interpréta-

tion de Copenhague comprenant principalement les idées de Bohr sur le principe de complémentarité serait de cette catégorie. L'interprétation statistique et les interprétations épistémiques le seraient aussi, mais semblent manquer d'une objectivité par rapport à la matière qui est tout de même présente dans l'interprétation de Copenhague telle que présentée au chapitre 2.

2. Les interprétations qui cherchent une modification de l'applicabilité universelle de l'équation de Schrödinger, soit en postulant un autre type d'évolution (effondrement lors d'une mesure [46]), soit en cherchant une équation maîtresse plus générale (p. ex. évolution non linéaire, effondrement stochastique [24], écart gravitationnel [35, 36]). Ces interprétations sont extrêmement contraintes par les résultats expérimentaux positifs vérifiant la mécanique quantique linéaire [51, p. 20].
3. Les interprétations qui cherchent une solution en termes de variables cachées (en particulier l'interprétation bohmienne [7]). Elles visent à restaurer le réalisme au niveau des objets fondamentaux (particule ?) au détriment de la localité microscopique en vertu du théorème de Bell [5, p. 14].
4. Les interprétations qui admettent la validité universelle de l'équation de Schrödinger et tentent d'interpréter les objets du formalisme de manière cohérente (l'interprétation d'Everett [22] et ses descendants, les *many-worlds* [17], *many-minds* [2], l'interprétation existentielle [53], le relativisme [37, 38], etc.)

Bien que ces catégories forment les principaux axes du débat sur l'interprétation, il n'était pas question ici de dresser une liste exhaustive et plusieurs idées alternatives n'ont pas été considérées et pourraient aussi ne pas entrer dans cette classification.

Dans ce travail, nous élaborerons trois de ces interprétations : l'interprétation de Copenhague au chapitre 2, l'interprétation d'Everett et la décohérence au chapitre 3 et l'interprétation bohmienne au chapitre 4. L'interprétation d'Everett sera approfondie au chapitre 5, pour arriver à une théorie objective indépendante de l'observateur qui possède les mêmes limitations statistiques sur la causalité que l'interprétation bohmienne et l'interprétation de Copenhague, lorsque le processus de mesure est convenablement analysé. La doctrine du positivisme logique, qui aura été utilisée pour justifier l'objectivité de l'interprétation de Copenhague et l'échec du corpuscule bohmien, sera développée encore davantage au chapitre 6. Finalement, la question de l'application de cette doctrine à l'interprétation d'Everett sera discutée.

Chapitre 2

L'interprétation de Copenhague

Bien que la plupart des physiciens se rangent au côté de l'interprétation de Copenhague lorsque vient le temps d'exprimer la vision étrange que la mécanique quantique nous donne de la nature, très peu de consensus peut être atteint si l'on demande des explications sur la signification physique de cette philosophie. Mysticisme, fantômes du réel ou abstractions sont trop souvent invoqués pour expliquer une apparence de propriétés objectives. Même après deux années d'étude, nous ne pouvons être absolument certains du contenu de cette interprétation telle qu'imaginée par Bohr ou Heisenberg. Par contre, nous sommes convaincus que cette interprétation ne fait intervenir aucun mysticisme ni aucune création de propriétés classiques. Voici donc un bref aperçu de ce que pourrait être l'interprétation de Copenhague.

2.1 La validité de la description classique

À la base de cette interprétation, il y a la reconnaissance que la nature elle-même ne se présente jamais avec des axiomes, seulement avec des résultats de mesure [34, p. 251] en raison de notre statut d'observateur interne à l'univers. De plus, il est une conséquence de l'Histoire (mais cela n'en dépend point) que la mécanique classique a été découverte avant la mécanique quantique pour expliquer la régularité dans les phénomènes naturels à l'échelle humaine, et que celle-ci s'est révélée par la suite, pouvoir expliquer une bien plus grande étendue de phénomènes. Cependant, la science moderne au travers de la technologie a permis d'augmenter considérablement la précision de mesures qui ont permis de dévoiler un nouveau champ expérimental dans lequel les phénomènes naturels transcendent l'explication classique. Néanmoins, "lorsque quelqu'un considère les bases de la physique moderne, on trouve que celle-ci n'affecte en rien la validité de la physique classique. [...] ce n'est pas la validité mais seulement l'applicabilité des lois classiques qui est

restreinte par la physique moderne” [26, p. 42]. En effet, aucune révolution conceptuelle ne peut modifier le fait que la mécanique classique est valide, efficace et suffisante à la description du domaine commun de l’expérience. Même la théorie de la relativité qui a été une révolution majeure dans notre façon de concevoir l’espace-temps ne change pas le fait que nous pouvons toujours considérer l’espace et le temps séparément dans un contexte local où la vitesse de la lumière peut être approximée comme étant infinie. Ce n’est que dans un contexte global que cette limitation vide de sens toute considération d’instantanéité ou de configuration d’un système. Ainsi la validité de la théorie classique est conservée bien que son domaine de validité soit irrémédiablement restreint. De la même manière, les expériences modernes ont montré que le contexte où on attribue des variables objectives locales aux objets physiques est trop restrictif pour représenter l’ensemble des phénomènes microscopiques (violations des inégalités de Bell, p. ex. [4, 3]). Mais encore, cela n’affecte pas l’objectivité des propriétés des objets classiques dans le domaine où elles sont valides (en tant que théorie) ni l’objectivité de l’objet physique (en tant que réalité). Un résultat de mesure sur un appareil macroscopique est de toute évidence objectif, il peut être comparé, enregistré et différents observateurs ont la même version de ce qu’est ce résultat. Le langage de la théorie classique est de toute évidence adéquat dans la description de cette objectivité qui, elle-même, transcende toute théorie.

however far the phenomena transcend the scope of classical physical explanation, the account of all evidence must be expressed in classical terms. The argument is simply that by the word “experiment” we refer to a situation where we can tell others what we have done and what we have learned and that, therefore, the account of the experimental arrangement and of the results of the observations must be expressed in unambiguous language with suitable application of the terminology of classical physics. [10, p. 209]

De même, Heisenberg reconnaît aussi que

Classical physics represents, in a sense, the clearest expression of the concept of matter, in that it attempts to make the description of the world as independent as possible of our subjective experiences. Because of this, the concepts of classical physics will always remain the basis for any exact and objective science. Because we demand of the results of science that they can be objectively proved (i.e. by measurements, registered on suitable apparatus), we are forced to express these results in the language of classical physics. [26, p. 44]

Mais alors, comment doit-on comprendre le fait qu’une description de la nature puisse transcender totalement les concepts classiques tout en devant, finalement, être exprimable dans ces mêmes concepts ? Par exemple, la variable position (ou l’impulsion) n’existe pas au niveau quantique. La réalité des objets doit plutôt être conçue de telle sorte qu’il puisse exister une superposition, une coexistence, de différentes instances de la variable classique

de position (ou d'impulsion)¹. Et dans l'infinité des façons que de telles superpositions peuvent exister, nous devons en choisir une très précise afin de représenter "l'état" du système. Toute l'interprétation de la théorie se fait sur la base que, parmi toutes ces représentations de l'état, certaines représentent des concepts classiques "purs". Ce sont les vecteurs propres de position, d'impulsion et d'autres concepts classiques. Ces vecteurs sont associés à leurs valeurs propres par le lien valeur propre–vecteur propre. L'interprétation statistique émerge du fait que l'on postule de ce lien, que la probabilité d'obtenir la valeur propre x quand le système est dans l'état propre $|x\rangle$ est 1, donc une certitude. On s'aperçoit ensuite rapidement que peu importe la superposition particulière nécessaire pour rendre compte de l'état, chaque instance de mesure montre bel et bien un résultat précis et défini (dans les limites de précision de l'appareil). Ceci n'est pas problématique lorsque l'état est un état propre comme décrit précédemment, mais que fait-on lorsque nous sommes forcés de considérer une superposition de deux états propres ? On doit de toute évidence obtenir un résultat unique (fait expérimental) mais l'état ne peut être associé à aucun état classique avec certitude. Il semble que les statistiques intrinsèques sont inévitables à ce point et il semble que la seule façon de les introduire de manière consistante est par la règle de Born du carré de l'amplitude de la fonction d'onde. La norme du vecteur d'état est une quantité totalement conservée. L'évolution temporelle ne fait que "tourner" le vecteur d'état dans l'espace de Hilbert et ainsi, ne change jamais sa norme. Finalement, les résultats expérimentaux associent sans équivoque le carré de la norme associée à un vecteur propre à la propension de trouver cette valeur particulière.

Pour nous, il semble clair dans cette situation que la nécessité fondamentale des probabilités en mécanique quantique provient de la demande logique de faire un lien avec les concepts classiques de l'expérience qui renferment l'idée même d'objectivité. *Aucune interprétation ne peut outrepasser cette demande* qui renferme l'idée même d'interprétation (c.-à-d. faire un lien entre deux choses que l'on connaît).

2.2 L'objectivité de la description quantique

L'interprétation de Copenhague reconnaît la limitation statistique discutée à la section précédente et insiste sur le caractère prédictif objectif de la théorie plutôt que sur la signification (comme images) des symboles qu'elle utilise. De plus, Bohr est assez clair sur le fait qu'il conçoit la représentation de l'état en termes de fonction d'onde comme ne représentant pas une réalité directe, mais un moyen prédictif lié à cette réalité non classique.

¹Nous savons très bien que la réalité est quelque peu plus compliquée, et que nous devons aussi considérer la possibilité de superposition dans un espace vectoriel à coefficients complexes.

[...] to emphasize that the appropriate physical interpretation of the symbolic quantum-mechanical formalism amounts only to predictions, of determinate or statistical character, pertaining to individual phenomena appearing under conditions defined by classical physical concepts. [10, p. 238]

L'interprétation est en ce sens pragmatique. Mais pragmatique et opérationnel vont apparemment souvent de pair.

The specification B on the subsequent measurement and possible result are similarly couched in a language that allows a suitably trained technician to set up a measurement of the specified kind and to determine whether the result that occurs is a result of the specified kind. [43, p. 1099]

Si on suit la description de Stapp, la mécanique quantique ne décrit aucunement la nature, seulement des situations expérimentales de laboratoire contrôlées. Cependant, cette conception semble totalement opposée au fait que la mécanique quantique ne décrit pas que des résultats de mesure en termes de probabilité. En fait, nous savons très bien que la mécanique quantique fonctionne en deux modes distincts que nous reconnâtrons comme le *mode statique* et le *mode dynamique*. Le mode dynamique gère toutes les prédictions d'ordre statistique sur les observations futures que l'on peut faire sur un système. C'est vraiment ce mode qui est le plus troublant, car les statistiques ne sont pas exprimables en termes d'une réalité locale. Le mode statique, quant à lui, est de toute évidence le plus intéressant, car il ne fait que des prédictions déterministes. C'est lui qui nous dit, lorsque l'on résout les équations aux valeurs propres, quelles sont les valeurs possibles d'une expérience et quels sont les vecteurs propres correspondants. Les interprétations sémantiques où la fonction d'onde reflète seulement une connaissance subjective d'un système sont souvent rejetées du fait qu'elles semblent minimiser l'importance de ces résultats déterministes et objectifs. De la même manière, une interprétation totalement opérationnelle minimise aussi l'importance de ce fait car les atomes devaient être stables bien avant l'existence des techniciens et, jusqu'à maintenant, seule la mécanique quantique explique cette stabilité. Il est vrai que l'on peut dire que l'interprétation de Copenhague est pragmatique mais il ne faut pas concevoir cette pragmatisme comme représentant la seule réalité. Bohr lui-même croyait à la réalité du sujet de la mécanique quantique [43, p. 1106] mais le statut d'observateur, l'enchevêtrement inévitable, ainsi que le caractère opérationnel intrinsèque à l'idée d'expérience, imposent des limitations sur la description de cette réalité. Le terme complémentarité devait unir cette idée de réalité microscopique à celle de la subjectivité de choisir entre plusieurs arrangements expérimentaux ou en d'autres mots, le réalisme du sujet et le pragmatisme opérationnel du technicien. Par exemple,

[...] it is only the circumstance that we are presented with a choice of *either* tracing the path of a particle *or* observing interference effects, which allows us to escape from

the paradoxical necessity of concluding that the behaviour of an electron or a photon should depend on the presence of a slit in the diaphragm through which it could be proved not to pass. [10, p. 217]

L'aspect fondamental du concept de complémentarité dans la conception atomique de Bohr est aussi apparent dans la citation suivante :

By its very nature this conception [the stationary state] means a complete renunciation as regards a time description. From the point of view taken here, just this renunciation forms the necessary condition for an unambiguous definition of the energy of the atom. [9, p. 80]

Le concept d'état stationnaire, nécessaire à la compréhension de la stabilité de la matière, est complémentaire à toute description causale dans le temps. Du point de vue d'Heisenberg, toute tentative de mesure de la trajectoire d'un électron autour de son noyau à l'intérieur d'un état stationnaire implique une perturbation aléatoire suffisante pour éjecter l'électron du noyau [27, p. 65], ce qui empêche de définir une description plus complète de l'état lié de l'électron. Mais c'est seulement lorsque cette impossibilité expérimentale (négative) devient une question de principe (positive) que les bases théoriques du concept d'état stationnaire peuvent avoir du sens même lorsque le système n'est pas observé. Il est donc désormais évident que la renonciation d'observer un phénomène complémentaire au détriment d'un autre n'a finalement rien à voir avec une subjectivité de choisir entre certaines variables réelles, mais est une condition nécessaire à l'explication des phénomènes atomiques. Dans la réponse à la critique de l'expérience de pensée d'EPR [20], le point principal de Bohr est justement que

[...] in the phenomena concerned we are not dealing with an incomplete description characterized by the arbitrary picking out of different elements of reality at the cost of sacrificing other such elements. [...] Any remaining appearance of arbitrariness concerns merely our freedom of handling the measuring instruments, characteristic of the very idea of experiment. [11, p. 149]

La complétude d'une théorie, par contre, est une question totalement distincte de celle de la réalité et de l'objectivité. Cependant, dans le cas de la mécanique quantique, la renonciation logique à mesurer certaines observables complémentaires demande que la description ainsi donnée soit complète. Dire que ce n'est pas le cas revient à rejeter l'idée même du concept d'état stationnaire, car cela signifierait qu'il *existe* des états supplémentaires dans l'espace d'états et rien n'empêcherait, *a priori*, ces états d'être atteints.

2.3 L'universalité de la description quantique

La description ainsi donnée nous semble très objective. Le dernier point sur lequel nous voudrions insister est la question de l'universalité de la description. Il n'est pas rare de lire que l'interprétation de Copenhague n'a jamais été pensée par Bohr comme étant universelle et qu'elle était seulement conçue pour exprimer en des termes non paradoxaux les propriétés étranges des objets quantiques. Cependant, de notre point de vue, l'interprétation de Copenhague ne différencie pas les objets en classes quantiques, mésoscopiques ou classiques. Elle apporte seulement les postulats nécessaires à la mesure opérationnelle de n'importe quelle quantité physique. Par exemple, Zurek écrit :

Thus quantum theory was not to be universal. The key feature of the Copenhagen interpretation is the dividing line between quantum and classical. Bohr emphasized that the border must be mobile, so that even the "ultimate apparatus"—the human nervous system—can be measured and analysed as a quantum object, provided that a suitable classical device is available to carry out the task. [52, p. 36]

Dans l'hypothèse où tout système peut être soumis aux postulats de la mécanique quantique, est-ce qu'une interprétation centrée sur la mesure et l'observateur peut être universelle ? Il doit être reconnu une fois pour toutes, entre autre à la suite du philosophe Irlandais Berkeley (1685-1753) [6] que le concept de l'univers comme conception indépendante de l'observation est simplement inconcevable. Tous les objets et phénomènes que l'on peut se représenter visuellement ou mentalement sont indissociables de leur relation avec leur observateur. Par contre, l'universalité comprise comme l'ensemble de tous les phénomènes observables, elle, est concevable. Si l'on comprend universalité en ce sens, que la mécanique quantique doit être applicable à tous les systèmes, l'interprétation de Copenhague est comprise comme universelle. L'universalité ne veut pas dire que la mécanique quantique est nécessairement absolue et on doit laisser une place dans notre esprit à l'éventualité que sa validité soit limitée à un contexte particulier. Le point est ici seulement que le concept d'univers indépendant de la mesure nous paraît moins fiable que celui de système mesurable. L'interprétation de Copenhague s'intéresse aux systèmes mesurables. Cette conception, qui inclut la possibilité de décrire tout système (même macroscopique) à l'aide de la mécanique quantique pour autant qu'il soit mesuré, serait sûrement contraire à la compréhension de Copenhague qui veut que

The Copenhagen interpretation additionally postulates that classicality is not to be derived from quantum mechanics, for example, as the macroscopic limit of an underlying quantum structure (as is in some sense assumed, but not explicitly derived, in the standard interpretation), but instead that it be viewed as an indispensable and irreducible element of a complete quantum theory—and, in fact, be considered as a concept prior to quantum theory. [39, p. 22]

Cependant, nous n'avons jamais vu ce postulat. Nous soulignons que c'est seulement la demande logique que tout résultat théorique et expérimental soit exprimable dans un langage commun, qui n'est pas contradictoire avec l'universalité telle qu'énoncée ci-haut, qui est requise. L'analyse d'Heisenberg semble être parfaitement en accord avec notre point :

Thus, while the *laws* of classical physics, seen from the point of view of modern physics, appear only limiting cases of more general and abstract connections, the *concepts* associated with these laws remain an indispensable part of the language of science, without which it would not be possible even to speak of scientific results [26, p. 45]

Clairement, Heisenberg conçoit une réalité objective derrière cette connexion abstraite. Nous éclairerons davantage ce point au chapitre 6. Le prochain chapitre est consacré à la démystification de l'interprétation d'Everett et à la perspective moderne donnée par le programme de la décohérence.

Chapitre 3

L'interprétation d'Everett

L'interprétation d'Everett est plus souvent comprise, et rejetée, pour l'idée qu'il existe une multiplicité de “mondes” objectifs coexistants, tous aussi réels que celui dans lequel nous “habitons”. Cette réinterprétation et popularisation, due principalement à DeWitt [18, 17], échoue sous plusieurs points à instancier l'idée derrière la proposition initiale d'Everett qui est de considérer seulement les corrélations internes à la fonction d'onde. Que certains éléments de la fonction d'onde puissent reconnaître eux-mêmes leurs états intrinsèques est la seule hypothèse faite sur la nature de l'observateur. L'étude des corrélations avec ces états “spéciaux” est le centre de l'idée selon laquelle le comportement classique peut être retrouvé du comportement de la fonction d'onde comme seule réalité sous-jacente. Le programme de la décohérence renforce cette idée.

3.1 Les états relatifs à la base de la structure de l'observation

De manière générale, l'enchevêtrement quantique entre deux sous-systèmes implique que l'on ne peut considérer les propriétés d'un des systèmes indépendamment des propriétés de l'autre. L'enchevêtrement est, comme nous l'avons mentionné, une généralisation de l'idée de corrélation mais sans l'objectivité des variables. Dans le cas d'une corrélation classique, il peut arriver que l'on connaisse subjectivement la valeur d'une variable conditionnellement à la valeur d'une autre. Ceci n'est pas problématique mais révèle seulement notre ignorance et le fait que les deux systèmes ont interagi de manière spécifique dans le passé. Par contre, on conçoit facilement l'existence indépendante de la valeur de la variable comme réalité en soi (*being-thus, be-able*). Avec l'enchevêtrement quantique, cette hypothèse sur la possibilité de concevoir les sous-systèmes indépendamment doit être retirée et il

ne reste que la corrélation. Ces corrélations s'expriment naturellement dans le langage des états relatifs. Pour une paire de systèmes enchevêtrés initialement dans un état quelconque, l'état relatif à un état $|\phi\rangle$ du premier système est l'état du deuxième système que l'on obtient après effondrement des variables du premier système sur le sous-espace engendré par le ket $|\phi\rangle$. De manière générale, n'importe quel état de deux systèmes couplés peut s'écrire sous la forme $|\Psi\rangle = \sum_i |\phi_i\rangle \otimes |\text{rel}_{\phi_i}\rangle$ où $|\text{rel}_{\phi_i}\rangle$ est justement l'état du deuxième système relatif à l'état $|\phi_i\rangle$ du premier. Pour cette raison, nous pourrions aussi les appeler états conditionnels puisqu'ils représentent l'état d'un sous-système conditionnellement à l'état d'un autre. Lorsque l'état du système global s'exprime simplement comme le produit tensoriel de l'état de deux systèmes, les sous-systèmes peuvent être traités comme indépendants, comme le seraient deux sous-systèmes classiques, ce qui ne veut pas dire qu'ils ne sont pas corrélés.

L'idée des états relatifs est en définitive, on le reconnaît, une conséquence du formalisme de la mécanique quantique et peut être seulement vue comme une astuce simplifiant les assertions faites à propos de systèmes complexes. Il est donc quelque peu étrange que l'interprétation porte ce nom. La première véritable hypothèse de l'interprétation d'Everett est l'idée que tous les postulats de mesure de la théorie standard peuvent être compris à partir des postulats minimaux sur le comportement de la fonction d'onde, qui est maintenant comprise comme étant une réalité physique objective. Une telle ontologie avait d'abord été envisagée par Schrödinger, qui voyait dans la forme de la fonction d'onde, la possibilité d'avoir à la fois particule et onde, la manifestation d'une particule étant une situation où la fonction d'onde est très localisée dans la base de la position. Cependant, cette hypothèse fut rejetée. Premièrement, une fonction d'onde très localisée est très soumise à sa dispersion naturelle en vertu du principe d'Heisenberg. Cette considération est moins importante lorsque l'on traite des objets très massifs ou liés qui ont moins ou n'ont pas tendance à diffuser. L'ontologie de Schrödinger pourrait donc être satisfaite à toutes fins pratiques dans des situations réalistes. Cependant, la véritable difficulté semblait venir du principe de superposition. En effet,

To demand that the ψ -function of a macro-system should be 'narrow' in relation to the macro-coordinates and momenta is incompatible with the principles of quantum theory. A demand of this kind is irreconcilable with the superposition principle for ψ -function. [12, Einstein, p. 212]

Car une superposition de paquets localisés est en général non localisée. Donc il paraît que si nous voulions étendre le formalisme de la mécanique quantique au niveau classique, nous nous retrouverions, selon les principes de la théorie, à devoir considérer l'existence de superpositions de la *représentation* d'objets classiques. L'objectivité accordée aux objets classiques semble être en contradiction avec cette idée. Cependant, un point fondamental

était sans doute négligé dans cette analyse. Le fait est que si nous voulons espérer une représentation quantique du monde macroscopique, l'observateur lui-même doit être inclus dans la description.

For any interpretation it is necessary to put the mathematical model of the theory into correspondance with experience. For this purpose it is necessary to formulate abstract models for observers that can be treated within the theory itself as physical systems [22, p. 455]

Cette demande n'a que peu de conséquences dans les théories classiques puisque les systèmes peuvent toujours être conçus indépendamment de l'observateur. Cependant, à cause de l'enchevêtrement, lorsqu'une interaction de mesure prend place entre un système et un appareil, un appareil et un être conscient, ou quoi que ce soit, on ne peut pas dire que la mesure corrèle l'état quantique objectif appartenant au système mesuré à celui de l'état quantique objectif de l'observateur¹. Donc en ce sens, il est attendu que, même si l'état initial d'un système est une superposition, une superposition ne soit pas nécessairement mesurée ou perçue. Plus précisément, la mesure d'observables locales comme la position, l'impulsion, l'énergie, etc., ne corrèle pas des superpositions de vecteurs propres de ces observables à des superpositions de la représentation de l'observateur mais plutôt, chacune des éventualités discernables par la mesure devient corrélée avec une version de la représentation du système observateur comme dans le processus suivant

$$\sum_i c_i |\phi_i\rangle \otimes \psi_0(x) \longrightarrow \sum_i c_i |\phi_i\rangle \otimes \psi_i(x) \quad (3.1)$$

Cette corrélation de mesure serait parfaite si les états $\psi_i(x)$ étaient tous parfaitement orthogonaux, c-à-d si $\int_{-\infty}^{\infty} \psi_i^*(x) \psi_j(x) dx = \delta_{ij}$. Dans ce cas, on reconnaîtra que les états relatifs aux états $\psi_k(x)$ de l'observateur sont respectivement les états $|\phi_k\rangle$ du système observé. Donc il semble que, suivant que le système mesureur peut reconnaître son propre état, disons $\psi_k(x)$, selon le principe du parallélisme psycho-physique², celui-ci peut considérer que l'état du système mesuré est définitivement $|\phi_k\rangle$ comme si l'état initial $\sum_i c_i |\phi_i\rangle$ s'était effondré sur une de ses composantes. Everett conclut alors que

It is found that experiences of the observer [...] are in full accord with predictions of the conventional "external observer" formulation of quantum mechanics, based on Process 1 [le postulat d'effondrement]. [22, p. 455]

Cependant, même avec l'hypothèse du parallélisme psycho-physique, pour vraiment pouvoir conclure que l'état relatif est devenu objectif par rapport à l'observateur au même sens

¹à l'exception du cas spécial où l'état du système est un vecteur propre de l'observable mesurée.

²c.-à-d. que toutes les propriétés de son état de conscience (psycho) superviennent sur son état physique microscopique.

que s'il avait subi un effondrement de von Neumann, il faut montrer que les autres composantes de la fonction d'onde ne peuvent pas affecter le comportement futur du système mesuré, du moins sur un intervalle de temps assez long. Ce problème a à voir avec la question de la possibilité de la recohérence de l'état global. Deuxièmement, puisque l'interprétation standard de la mécanique quantique n'accorde aucune préférence à une base particulière de l'espace de représentation de l'état quantique et que les corrélations présentes dans un état ne sont souvent pas spécifiques à une seule base, l'idée d'accorder une objectivité particulière à une base, dans laquelle l'observateur reconnaît son état, plutôt qu'une autre semble être une difficulté majeure. Ce problème s'appelle le problème de la base préférée et est souvent rapporté par les détracteurs de l'interprétation d'Everett (e.g. [31, p. 11], [5, p. 96], [2, p. 201]). Effectivement, c'est un problème majeur qui a rapidement répandu l'idée que l'interprétation d'Everett devrait être complétée par une structure définissant cette base préférée. Cette idée a aussi rapidement mené à une comparaison entre l'interprétation d'Everett et la mécanique bohmienne, qui ajoute l'ontologie d'une particule (base de la position) tout en gardant l'évolution de Schrödinger pour la fonction d'onde comme absolue. Pour cette raison, nous étudierons l'interprétation bohmienne au prochain chapitre, mais considérons d'abord une perspective moderne sur les deux problèmes présentés ci-haut.

3.2 Le programme de la décohérence et l'interprétation existentielle

Le programme de la décohérence ne relève pas en lui-même de l'interprétation de la théorie. Comme dans le cas classique, la décohérence quantique est le phénomène engendré par l'interaction aléatoire d'un système avec son environnement. Plus un système est macroscopique, plus il interagit fortement avec son environnement, c.-à-d. plus il le perturbe. Classiquement, à cause du fait que chaque interaction individuelle est très faible et aléatoire, l'effet de l'environnement sur ces systèmes a tendance à souvent être négligeable et ceux-ci peuvent donc être conçus comme évoluant indépendamment. Cependant, même dans ce cas, l'effet du système *sur* l'environnement n'est jamais négligeable. La décohérence quantique provient essentiellement du même phénomène mais le véritable enjeu est l'enchevêtrement entre le système et son environnement. La barrière n'est effectivement pas claire entre la véritable décohérence irréversible et l'interaction ordinaire [32, p. 430] car les arguments des décohérentistes reposent le plus souvent sur l'enchevêtrement seul, n'accordant parfois aucune importance à l'amortissement et à l'augmentation d'entropie. Cependant, la raison est probablement plus pratique qu'autre chose : on parlera d'interaction ordinaire lorsqu'il

est toujours possible conceptuellement de tenir compte en pratique de toutes les parties participant à l'interaction tandis que nous parlerons de décohérence, d'irréversibilité, lorsque ce n'est plus possible. Le même problème se posait déjà en mécanique classique : comment l'entropie augmente-t-elle si on tient compte de toute l'information ? En fait, la reconnaissance de l'impossibilité pratique de tenir compte de toute l'information d'un grand nombre de degrés de liberté microscopiques a des conséquences théoriques, car c'est seulement à ce prix que l'entropie peut être conçue comme une propriété objective qui ne dépend pas de la connaissance subjective d'un observateur particulier. Utilisant cette conséquence comme postulat, l'impossibilité pratique est ensuite expliquée en termes de la théorie.

Contrairement à l'effet de perturbation, l'effet de l'enchevêtrement augmente toujours plus la macroscopicité du système est importante. *Il ne devient jamais négligeable* au même sens que l'entropie ne diminue jamais. Imaginons que nous ayons un système macroscopique décrit par un ensemble de macro-observables \mathcal{X} et supposons que ce système soit d'abord préparé dans un état de superposition $|\psi\rangle = \int_{-\infty}^{\infty} dx \psi(x) |x\rangle$ d'une ou plusieurs des macro-observables. De plus, nous supposons que les macro-observables ont été choisies telles que $[\mathcal{X}, \mathcal{H}_{\text{int}}] = 0$ c.-à-d. que l'interaction entre l'environnement et le système ne perturbe pas ces macro-observables. L'effet de l'environnement est donc similaire à celui d'une mesure non perturbative de l'observable \mathcal{X} . L'analyse de l'interrelation entre la dynamique intrinsèque du système et l'interaction avec l'environnement devrait être prise en compte dans une situation réaliste mais nous nous contenterons d'ignorer l'effet de l'évolution naturelle du système lui-même, concevant que les temps naturels de l'évolution dynamique des macrovariables du système sont beaucoup plus longs que les temps intervenant dans les interactions avec l'environnement. On reconnaîtra plus loin que, dans cette optique, la décohérence quantique est due à l'effet du système sur l'environnement et non le contraire, en opposition aux effets d'amortissement ou au mouvement brownien. L'important est donc vraiment de considérer schématiquement le devenir de l'environnement sous l'interaction \mathcal{H}_{int} . Un Hamiltonien d'interaction tel que $\mathcal{H}_{\text{int}} = -g\delta(t - t_i)\mathcal{X} \otimes \mathcal{A}$ satisferait à ces hypothèses où \mathcal{A} est un opérateur agissant sur les degrés de liberté y de l'environnement. Essentiellement, cet Hamiltonien agit sur l'environnement seulement autour de $t = t_i$ et représente une mesure impulsive de la position du système par l'environnement. Évidemment, cette mesure est parfaite et permet donc de discriminer tous les états du système ce qui est impossible pour des raisons pratiques. Néanmoins, même dans le cas où une interaction ponctuelle ne discrimine pas des états différents du système, on peut toujours compter sur le fait que l'environnement est très vaste et que de telles interactions aléatoires sont fréquentes. Supposons que l'état initial de l'environnement est un état général $|\epsilon\rangle$ pouvant être représenté dans la base de ses micro-observables y qui rendent compte de tous les in-

nombrables degrés de liberté microscopiques et, puisque l'interaction représente des temps courts, considérons que l'interaction interne de l'environnement est aussi négligeable. On se retrouve qu'il nous reste que (voir l'appendice A)

$$\begin{aligned} |\Psi(t)\rangle &= \mathcal{U}(t, 0)|\psi(0)\rangle \otimes |\epsilon(0)\rangle \\ &= \int dx \psi(x, 0)|x\rangle \otimes \mathcal{U}_x(t, 0)|\epsilon(0)\rangle \end{aligned} \quad (3.2)$$

où, dans notre cas,

$$\mathcal{U}_x = \exp\left(\frac{igx}{\hbar}\mathcal{A}\right) \quad (3.3)$$

Par ailleurs, exprimant le vecteur (3.2) sous la forme d'un opérateur densité et prenant la trace partielle sur les variables y de l'environnement, on obtient

$$\begin{aligned} \rho_S(t) &= \text{Tr}_E \rho(t) = \int dy \langle y|\Psi(t)\rangle \langle \Psi(t)|y\rangle \\ &= \iint dx dx' \psi(x, 0)\psi^*(x', 0)|x\rangle \langle x'| \langle \epsilon(0)|\mathcal{U}_{x'}^\dagger(t, 0)\mathcal{U}_x(t, 0)|\epsilon(0)\rangle \end{aligned}$$

La difficulté revient maintenant à évaluer le terme $\langle \epsilon(0)|\mathcal{U}_{x'}^\dagger(t, 0)\mathcal{U}_x(t, 0)|\epsilon(0)\rangle$ dans des conditions particulières. Les détails techniques pour une évaluation rigoureuse dépassent le contexte de ce travail mais, selon plusieurs hypothèses réalistes et dans une variété de situations, on trouve qu'il tend essentiellement vers une fonction produisant le même effet qu'une fonction $\delta(x - x')$ lorsque l'interaction est longue par rapport au temps moyen pour la première collision (t_i) et quand l'environnement est vaste (beaucoup de possibilités d'enchevêtrement)³. Dans ce cas idéal, l'opérateur densité du système se simplifierait à

$$\int dx \psi(x, 0)\psi^*(x, 0)|x\rangle \langle x| = \int dx P_\psi(x)|x\rangle \langle x| \quad (3.4)$$

qui n'est pas équivalent à l'état pur $|\psi(0)\rangle$; l'opérateur densité de cet état pur serait

$$\iint dx dx' \psi(x, 0)\psi^*(x', 0)|x\rangle \langle x'| \quad (3.5)$$

L'état représenté par (3.4) est donc essentiellement la somme des termes diagonaux de (3.5). Il est donc convenable de désigner (3.4) comme un mélange statistique impropre (selon la nomenclature de d'Espagnat [15, p. 101]), c.-à-d. un mélange dans lequel tous les termes sont considérés comme coexistant pour tenir compte de la possibilité d'interférence de l'état

³Voir par exemple Joos [25, p. 56] et/ou d'Espagnat [15, p. 274] pour quelques exemples similaires simples examinés un peu plus en détail.

global de $S + E$. De ce fait, on ne peut pas conclure qu'un des éléments du mélange est devenu actuel par rapport aux autres. Par contre, on peut conclure que le comportement local, c.-à-d. du point de vue des observables \mathcal{X} seulement, est comme si les autres composantes du mélange étaient inexistantes puisque toute possibilité d'interférence a disparu. De manière générale, la conclusion est que les systèmes macroscopiques qui ont une grande influence sur l'état de leur environnement ont tendance à se comporter comme s'ils avaient subi un effondrement dans une base qui est stable par rapport à la perturbation de cet environnement.

Entres autres pour cette raison, on ne peut associer définitivement une interprétation particulière au programme de la décohérence puisqu'il prédit les mêmes résultats avec ou sans considérer l'effondrement. C'est un effet physique. Néanmoins, ce constat motive une forme moderne de l'interprétation d'Everett due principalement à Zurek [52, 53] mais dont on retrouve aussi l'idée, par exemple, chez Zeh [49, 50], Wallace [47, 48], Saunders [37, 38], Deutsch [16], Vaidman [44], Squires [42] et sans doute plusieurs autres. Le point commun de toutes ces approches est que l'idée de multiplicité qui a mené à l'idée des mondes multiples de DeWitt est relaxée. Les mondes ne sont plus compris comme des entités définitives ayant une existence objective et éternelle indépendante, ce qui menait finalement aux mêmes problèmes qu'avec l'effondrement. Vaidman écrit :

The MWI [l'interprétation des mondes multiples] is not a theory about many objective "worlds". A mathematical formalism by itself does not define the concept of a "world". The "world" is a subjective concept of a sentient observer. All (subjective) worlds are incorporated in one objective Universe. [44, p. 1]

exprimant bien que nous n'avons pas à faire à une multiplicité de mondes objectifs qui devraient se diviser objectivement. Les "mondes" sont des structures stables qui évoluent localement dans un seul univers fondamentalement quantique et nous pouvons seulement observer l'effet de cet univers purement quantique lorsque la cohérence est élevée entre deux ou plusieurs éléments de la grande superposition. Ces situations se retrouvent naturellement chez les objets microscopiques où peu de degrés de liberté sont impliqués. Dans le cas contraire, les structures stables face à l'effet de la perturbation de l'environnement ne possèdent que certaines corrélations spécifiques entre elles tandis que d'autres sont perdues dans la délocalisation de la phase de la fonction d'onde. L'effet est une règle de supersélection approximative qui résout, au niveau des apparences classiques, le problème de la base préférée. Zurek explique que

The perception of unique events [par opposition au étranges superpositions] can be accounted for naturally from within the framework of decoherence. All of the arguments against decoherence [...] express dissatisfaction with it because it does not force all of the wavefunction of the universe into a unique state corresponding directly to

our experience. Rather, it explicitly assumes that the observers are an integral part of the universe and analyzes the measurement-like processes through which perception of the familiar classical reality comes about, thus showing why one can be aware of only one alternative. I do not believe that a fundamental collapse is called for either by the experiments or by our direct experience. Such an overly ambitious goal seems to deny the operational nature of our perceptions. [53, p. 88]

De même, Zeh écrit que

Superposed world components describing the registration of different macroscopic properties by the “same” observer are dynamically entirely independent of one another [50, p. 191]. The stability of memory states leads to an “objectivization” of the corresponding measurement results [49, p. 116]

insistant encore sur l'importance des propriétés dynamiques de la fonction d'onde dans la définition fonctionnelle de ce qu'est un “monde” dans une interprétation à la Everett. Ceci forme essentiellement la base de ce que Zurek appelle l'interprétation existentielle (IE). La structure supplémentaire recherchée pour expliquer la base préférée est maintenant fournie par l'évolution de Schrödinger seule, perfectionnant ainsi l'idée initiale d'Everett. Seuls les états robustes par rapport à l'interaction avec l'environnement peuvent être associés à des états “classiques” possédant des propriétés objectives. “Objectif” a ici un sens bien particulier : l'état d'un système est objectif dans le cas où le concept “d'indépendance classique des systèmes” peut être utilisé à toutes fins pratiques en relation avec ce système. Le partitionnement en termes d'états relatifs dans une base quasi orthonormale (mélange impropre dû à la décohérence) forme une superposition dans laquelle chaque élément respecte cette objectification. Il n'en reste pas moins que, d'un point de vue global, la fonction d'onde est la seule réalité. L'objectification n'est donc clairement pas une propriété globale de la représentation de l'état. Ce n'est que lorsque l'on se place d'un point de vue local à un certain état robuste face à l'interaction avec l'environnement que l'on observe que les seules corrélations qui affectent son évolution future, outre son propre état, sont les quelques corrélations très spécifiques qui ne sont pas détruites par l'interaction avec l'environnement. Incidemment, ces corrélations sont celles de la position relative des corps ce qui est fortuit car, comme Bell l'a remarqué, toute mesure revient essentiellement à une mesure de la position [5, p. 10]. Dans la circonstance où l'évolution locale ne dépend que d'une actualité de la position des autres systèmes, on peut accorder le même statut d'objectivité que l'on accorde en mécanique classique car l'enchevêtrement est maintenant réduit à une corrélation simple. Cette conclusion est valide même en dehors de l'observation puisque ces corrélations sont des faits de l'état global. Mais l'analyse du processus de mesure est la seule chose vraiment primordiale, car toute falsification passe par l'expérience. L'introduction de modèles théoriques de l'observateur dans ce schéma semble suffisante pour expliquer

les perceptions de résultats uniques et définis. La discussion relative à la pertinence de ces modèles théoriques de l'observateur est repoussée au chapitre 5.

Pour résumer, la relativité des états quantiques, sécurisée par l'indépendance logique fournie par la décohérence, explique l'apparence du comportement classique (sans superposition, comme si le système avait des variables objectives) entre deux mesures effectuées sur un même système. Il vaut peut-être la peine de répéter que la classicité d'un état n'est pas comprise comme une réalité transcendante que l'état doit posséder. Plutôt, on comprend que cela signifie que seulement certaines corrélations sont présentes entre deux mesures, faisant en sorte que le comportement aurait aussi pu être décrit par l'attribution de variables classiques objectives dans une certaine limite de précision. Seulement dans cette circonstance un objet peut être compris comme classique. Nous y reviendrons. Nous reviendrons aussi plus loin sur la validité de l'interprétation d'Everett en relation avec la conception opérationnelle de l'interprétation de Copenhague. Nous verrons que, comme Everett l'avait mentionné, "la relation entre cette nouvelle formulation et l'ancienne formulation est donc celle d'une métathéorie à une théorie." [22, p. 454]. De plus, les limitations statistiques fondamentales, inhérentes à toute formulation, affectent l'ontologie que l'on peut accorder aux mondes dans l'interprétation d'Everett. La source du contentieux avec les détracteurs de l'interprétation d'Everett est souvent une erreur dans la conception et la signification des "mondes" que nous avons tenté de clarifier quelque peu dans ce chapitre.

Chapitre 4

Le contre exemple de la mécanique bohmienne

Au chapitre 2, nous avons mentionné la question de la nécessité logique de l'abandon du concept de causalité permettant les bases théoriques de l'idée d'état stationnaire. Cette idée est le concept fondateur de la mécanique quantique. La mécanique bohmienne semble passer outre cette nécessité et permet à certaines *be*-ables d'avoir des valeurs précises et objectives en tout temps. Il semble à première vue que cela contredise l'idée que l'abandon de la causalité soit une nécessité. Comme la mécanique bohmienne a souvent été reconnue comme une version de l'interprétation d'Everett avec une spécification des mondes (ou de l'histoire, ou d'actualité), il nous sera essentiel de reconnaître que cette spécification des mondes n'a aucun lien avec les résultats que la théorie permet de prédire et que le retour de la causalité se base sur une fausse ontologie.

4.1 Les bases de la reformulation bohmienne

L'inégalité de Bell [5, p. 14] n'exclut pas expressément l'existence de théories aux variables cachées réalistes mais plutôt leur conjonction avec le principe de localité. De ce fait, la mécanique bohmienne est une théorie explicitement non locale c'est-à-dire que la configuration d'un sous-système peut influencer instantanément la dynamique d'un autre sous-système éloigné. Pour bien comprendre cet effet à distance, il est essentiel de développer un peu le langage de cette théorie. Partant de l'équation de Schrödinger d'une particule libre dans un potentiel $V(x)$ et du fait que toute fonction complexe $\Psi(x, t)$ peut être écrite sous la forme $P(x, t)^{1/2} \exp\left(\frac{i}{\hbar} S(x, t)\right)$ où $P(x, t) = |\Psi(x, t)|^2$, nous obtenons aisément la dépendance temporelle de la norme et de la phase en séparant les parties réelles

et imaginaires. L'équation

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \nabla \left(\frac{P \nabla S}{m} \right) = 0 \quad (4.1)$$

exprime la conservation de la probabilité lorsque l'on reconnaît que $v = \frac{\nabla S}{m}$ est le champ de vitesse dans l'espace des configurations, tandis que

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -\frac{(\nabla S)^2}{2m} - V(x) - U(x) \quad (4.2)$$

est l'équation d'Hamilton-Jacobi d'une seule particule dans un potentiel modifié où

$$U(x) = \frac{\hbar^2}{4m} \left[\frac{(\nabla P)^2}{2P^2} - \frac{\nabla^2 P}{P} \right] \quad (4.3)$$

Cette fonction exprime une nouvelle forme de potentiel, un nouveau moteur du mouvement de la particule au point x associée à une distribution initiale de probabilité $P_0(x, t_0)$. Ce potentiel est appelé potentiel quantique ([7], [29, chap. 2]). L'idée d'un potentiel quantique n'était pas totalement nouvelle, de Broglie ayant déjà imaginé la possibilité de l'existence d'une nouvelle force guidant les particules dans des distributions non classiques. Cette idée de guidage est la raison pour laquelle la théorie de Bohm est aussi connue sous le nom de "pilot-wave theory"—l'onde pilote. Aussi étrange que cela puisse paraître à première vue, il ne faut pas négliger le fait que les seules preuves que nous possédons de l'existence des champs tels que le champ électrique et magnétique sont les effets que ceux-ci produisent sur les objets qui nous sont communs. Pourtant, nous considérons ces champs dans leur ensemble comme objectifs. Mais encore, les seules preuves que nous avons de ces objets "communs" sont aussi indirectes et il est reconnu par le présent auteur que la seule signification de ce que l'on entend par "réalité" lorsque l'on parle d'un concept ou d'un objet est son utilité quant à la prédiction de relations entre d'autres de ces concepts et objets. Certains semblent plus naturels parce que les relations qu'ils définissent nous sont familières en conséquence de notre éducation et notre évolution. Le concept de potentiel quantique dans la théorie bohmiennne vient effectivement expliquer la relation entre la préparation de mesure et les résultats de la mesure finale. L'avantage est qu'il le fait en utilisant seulement des concepts auxquels nous étions déjà plus ou moins familiers en raison du parallèle avec les champs classiques. C'est l'avantage conceptuel de la représentation donnée par la théorie bohmiennne.

La mécanique bohmiennne est donc essentiellement la mécanique classique (causale) où l'on ajoute le potentiel quantique (aussi causal car on considère l'évolution donnée par l'équation de Schrödinger comme valide en tout temps). Lorsque le potentiel quantique sa-

tisfait l'équation de Schrödinger et les conditions aux frontières, la mécanique bohmienne ne peut donner de résultat empiriquement différent de la mécanique quantique orthodoxe. Comme la densité de probabilité de trouver la particule à un point donné est, traditionnellement, le carré de la fonction d'onde et que cette valeur est égale numériquement à la densité de probabilité que la particule bohmienne *soit* présente en ce point (car seules les distributions $\Psi^*(x)\Psi(x)$ satisfont aux conditions ci-haut), la valeur de la position mesurée *est* directement la position du corpuscule bohmien. Comme toute mesure est essentiellement une (ou plusieurs) mesure de la position [5, p. 10], la mesure de n'importe quelle observable peut être incluse dans ce schéma. Dans une telle situation, le problème de la mesure est résolu très simplement. Nous retrouvons une objectification réelle où le résultat de la mesure et la valeur de la *be*-able peuvent être conçus, en principe, indépendamment de la mesure elle-même et de l'observateur. Le recours aux statistiques est ici, apparemment, seulement dû à l'ignorance subjective de l'observateur.

4.2 L'étrange non-localité du potentiel quantique

Le premier problème avec la mécanique bohmienne, s'il en est un, est la nature du potentiel. Il est explicitement non local. Ce n'est pas vraiment problématique lorsque l'on considère des systèmes constitués d'une seule particule physique. Cependant, lorsque l'on considère un système de plusieurs particules en interaction, l'holisme de la mécanique quantique a pour conséquences que le potentiel quantique est local seulement dans l'espace de configuration. Lorsque l'on se représente le système de particules dans l'espace ordinaire tridimensionnel, on se retrouve avec des connexions non locales où ce qui arrive à une particule influence instantanément les autres particules distantes. Les difficultés de comprendre les effets non locaux des interactions à distance de la théorie bohmienne se sont révélées très clairement dans une série d'articles sous la bannière générale des "particules surréalistes" [21, 1, 40]. Dans ces cas, l'interaction non locale produisait un effet à un endroit où la particule bohmienne n'était pas présente (selon les calculs), suggérant que la particule n'a en fait aucune réalité dans cette théorie puisque l'on supposait que tout effet supervenait sur l'état des particules seulement. Ces expériences de pensée ont été initialement conçues pour tenter de prendre la mécanique bohmienne en défaut. Cependant, le résultat obtenu a été une clarification de ce que l'on devait attendre de l'effet d'un potentiel non local [45]. Ce potentiel ne supervient pas sur une configuration des particules uniquement et doit être considéré comme une partie indépendante de la réalité. Le problème de la non-localité du potentiel quantique se cristallise davantage lorsque l'on tente de produire une théorie bohmienne avec une ontologie microscopique relativiste. La non-localité im-

plique la sélection d'un référentiel privilégié dans lequel l'interaction est instantanée. Mais instantanée est vide de sens en relativité justement parce que nous avons admis l'invariance des lois physiques comme principe plutôt que l'invariance du référentiel.

Mais il semble que le potentiel quantique soit encore plus étrange qu'un potentiel simplement non-local comme l'était la gravité telle que conçue par Newton par exemple. Lorsque l'on concevait les interactions à distance dans un référentiel absolu, le potentiel en tant que tel dépendait néanmoins de la configuration du système seulement et on pouvait déterminer l'effet à partir de l'état. Dans le cas de la mécanique bohmienne, il est évident que l'état de la particule dans l'espace de configuration est insuffisant à la spécification de la force produite par le potentiel quantique. Nous voyons deux manières de considérer le potentiel quantique comme une entité réelle en relation avec la particule bohmienne. Premièrement, on peut admettre d'entrée de jeu un dualisme explicite du potentiel, obéissant à l'équation de Schrödinger seulement, et de la particule, obéissant à l'équation du mouvement seulement. Le potentiel quantique est contextuel et doit être évalué totalement indépendamment d'une situation particulière de la particule. Dans ce cas, l'état d'un système est totalement spécifié par le doublet $(x, \Psi(x, t))$ ¹. Cela semble très étrange. La deuxième manière de voir le potentiel quantique est comme une conséquence de l'ensemble de trajectoires $P(x, t)$. En effet, l'évaluation du potentiel à un temps ne dépend que de la norme de la fonction d'onde mais seules les distributions initiales $\Psi^*(x, 0)\Psi(x, 0)$ où $\Psi(x, 0)$ est une solution de l'équation de Schrödinger sont consistantes avec l'expérience. Dans ce cas, on dira que le potentiel est contrafactuel, c.-à-d. qu'il dépend des faits qui n'arrivent pas puisque l'on dit que la réalité est seulement une des particules bohmiennes de l'ensemble sans qu'on puisse savoir laquelle. Dans ces deux cas, dans une expérience d'interférométrie, bien que la particule bohmienne passe par une seule frange, on doit considérer la contribution de toutes les autres possibilités de tout l'arrangement expérimental dans l'évaluation du potentiel. Cet effet doit-il effectivement être vu comme un autre exemple de la non-localité bohmienne qui fait en sorte que toutes les possibilités sont instantanément connues par une quelconque réalité qui agit sur la particule, ou avons-nous vraiment à faire à une dépendance sur les faits qui n'arrivent pas (contrafactuel) ? La question à savoir si un de ces points de vue l'emporte n'est pas bien comprise par le présent auteur. Il ne fait aucun doute par contre que ce genre d'effet est en ce sens très éloigné de la conception classique d'effet à distance. D'une manière ou d'une autre, pour connaître l'état du système en mécanique bohmienne, on doit à la fois connaître la configuration de la particule ainsi que l'ensemble de conditions initiales classiques $P(x) = \Psi^*(x)\Psi(x)$ satisfaisant à l'équation de Schrödinger.

¹Il ne faut pas confondre la variable x et la position de la particule x .

La difficulté de penser en termes de non-localité est troublante. Comme discuté par Einstein, le principe de localité est plus qu'une demande que les théories physiques doivent satisfaire, c'est sur ce principe que toute observation expérimentale repose. En effet, sans la localité "l'idée de l'existence des systèmes quasifermés, et par conséquent la postulation de lois de la physique pouvant être testées empiriquement au sens commun, deviendrait impossible." [19]. Pour donner un exemple plus concret de ces considérations, imaginons un détecteur conçu pour détecter le passage d'une particule. De toute évidence, peu importe pour quel type d'expérience on construit ce détecteur, le principe de localité est imbriqué implicitement dans sa conception car nous voulons que le détecteur nous signale seulement le passage d'une particule lorsqu'une particule passe effectivement dans l'appareil. Le principe est instancié par le fait que l'on détectera une conséquence locale du passage d'une particule, par exemple, la polarisation que laisse une particule chargée. Le fait que le détecteur instancie l'idée de localité dans sa conception même ne veut pas dire que la nature est nécessairement locale pour autant. Cependant, tout contexte possiblement non paradoxal et non local devra implicitement être interprété comme paradoxal et local (comme dans le cas des particules surréalistes mentionné plus haut), car la mesure ne peut pas être conçue en dehors et indépendamment de la localité. Dans le cas où les résultats de mesure sont effectivement paradoxaux avec notre interprétation usuelle, il est alors naturel de changer la théorie de manière à conserver la localité car c'est seulement sur cette base que la mesure paradoxale a pu être faite en premier lieu. L'abandonner revient à remettre en question son détecteur. Ces difficultés nous portent à favoriser la localité comme métaprincipe de la nature. Cependant, ce n'est pas sur cette base philosophique que porte notre attaque de l'interprétation bohmienne.

4.3 Pourquoi l'interprétation bohmienne perdrait-elle ?

La mécanique bohmienne appartient à la catégorie des interprétations sans effondrement (ISE). La fonction d'onde du système, comme le potentiel quantique, évolue toujours selon l'équation déterministe de Schrödinger et par conséquent, on doit toujours considérer possible une recohérence de la fonction d'onde d'un système menant à des effets observables sur le comportement de la particule. Dans cette situation, le programme de la décohérence a les mêmes vertus que dans l'interprétation d'Everett pour expliquer l'indépendance logique entre certaines parties du potentiel quantique. Plus précisément, le potentiel quantique affectant une particule bohmienne se comportant comme une particule classique ne doit pas subir d'interférence (dans la base de la position), auquel cas la particule subirait des changements irréguliers de position qui seraient observables et inexplicables en termes du potentiel

classique $V(x)$. Entre autres pour cette raison, l'interprétation bohmienne a été comparée à une interprétation d'Everett dans laquelle un "monde" est actualisé par la particule. Par exemple, Bell considère que l'interprétation d'Everett est "simplement la théorie de l'onde pilote sans les trajectoires" [5, p. 133]. Évidemment, si l'on considère seulement la fonction d'onde, les deux disent essentiellement la même chose puisqu'elles sont toutes deux une conséquence directe du même formalisme. Par contre, il y a une grande différence d'ontologie entre l'idée d'un potentiel et l'idée d'un univers quantique instanciant une multiplicité de perceptions. Dans le premier cas, on considère que le potentiel global est objectif par rapport à un observateur mais que celui-ci ne peut être connu que par une succession de mesures. De la même manière, on considère que le potentiel électrique a une valeur partout dans l'espace mais les conséquences de ce potentiel ne sont révélées que par l'action sur d'autres particules chargées. Dans l'interprétation bohmienne, le potentiel quantique est objectif dans l'espace de configuration. En comparaison, dans l'interprétation d'Everett que nous avons discutée, seule une petite partie de la fonction d'onde, relative à un observateur, est objective par rapport à ce dernier. L'objectivité est très locale dans l'interprétation d'Everett. En d'autres mots, le rôle différent accordé à la fonction d'onde dans ces deux interprétations fait en sorte que la mécanique bohmienne décrit *un* univers avec une fonction d'onde globale et, supposément, une *unique* actualité donnée par la particule tandis que l'interprétation d'Everett décrit *un* univers avec une *multiplicité* d'actualités donnée par la structure intrinsèque de la fonction d'onde.

Mais nous nous demandons si la particule décrit vraiment *une* actualité. Cela peut paraître étrange puisque le concept de particule amène l'idée de résultat unique et d'objectivité. Cependant, selon l'hypothèse que le potentiel quantique dépend des contrafactualités, c.-à-d. qu'il ne dépend pas seulement de l'actualité mais aussi de toutes les autres possibilités, il semble plus naturel de comprendre une position actuelle de la particule bohmienne comme une parmi tant d'autres comme de comprendre l'actualité des mesures par la relativité des états. Dans ce cas, on se retrouve avec essentiellement la même situation qu'avec l'interprétation d'Everett : Le potentiel quantique est une propriété objective de l'univers, équivalente à la fonction d'onde ou au vecteur d'état, et la particule sélectionne une possibilité comme actualité, mais seulement dans un sens relatif comme l'actualité est choisie au sens d'Everett. Aucune cause n'est attribuée à cette actualité, d'où le recours aux statistiques intrinsèques dans la détermination de l'état futur du système lorsque plusieurs possibilités sont en jeu. C'est ce qui justifie Wallace et Brown de conclure que

From this viewpoint, the corpuscle's role is minimal indeed : it is in danger of being relegated to the role of a mere epiphenomenal "pointer", irrelevantly picking out one of the many branches defined by decoherence, while the real story—dynamically and ontologically—is being told by the unfolding evolution of those branches. [13, p. 527]

Ainsi, la particule bohmienne, puisque non connaissable par principe, ne peut effectivement jouer aucun rôle dans la prédiction de l'état futur d'un système. Par conséquent, celle-ci doit être exclue de la conception de la théorie. On reconnaîtra que la situation est vraiment très similaire à la question d'un référentiel absolu en relativité. Le statut du référentiel absolu dans la conception pré-einsteinienne de l'invariance relativiste est admirablement bien exprimé par David Bohm

[...] according to the Lorentz theory every measurement of the velocity of light will lead to the same result, independent of the speed of the laboratory relative to the ether [le référentiel absolu]. Nevertheless, this theory formulates all its laws and equations in terms of "true" distances and times, measured by rulers and clocks that are supposed to be at rest in the ether. Therefore, the measured distances ought to be corrected, to take into account the effect of the movement of the instruments before we can know what they really mean [en termes de vraies distances et de vrais temps]. But if the Lorentz theory is right, there can be no way thus to correct observed distances and times. The "true" distances and times are therefore inherently ambiguous, because they drop out of all observable relationship that can be found in actual measurements and experiments. [8, p. 49]

Les partisans de la mécanique bohmienne argumenteront contre cette analogie en disant que, contrairement au référentiel absolu, les résultats de mesure permettent de trouver la "vraie" position de la particule bohmienne. En ce sens, il est faux de dire que le corpuscule ne joue aucun rôle dans les résultats : si on observe tel résultat, l'état de la particule *était* dans tel intervalle de valeur. Mais tout le problème est que la particule ne permet que de connaître ce qui était (dans le passé) et rien de ce qui sera (dans le futur). Cette ontologie repose donc seulement sur un préjugé classique. Avec le même préjugé, on peut tracer le parcours passé d'une particule, ayant subi une mesure d'impulsion suivie d'une mesure de position, violant le principe d'incertitude d'Heisenberg. Heureusement, pour cette prédiction qui prouverait fausse la mécanique quantique, aucune expérience ne peut être conduite dans le passé. Donc l'analogie à faire avec le problème du référentiel absolu est que peu importe la valeur "réelle" de la position du corpuscule, celui-ci n'a aucune conséquence ni dans la mesure, ni dans l'expérience puisqu'il se doit d'être inconnu *par principe* pour que les résultats respectent ceux prédits par la mécanique quantique orthodoxe.

Le positivisme logique, que nous élaborerons au chapitre 6, est la doctrine qui nous force à abandonner une fausse question qui a une réponse négative (quelque chose que la nature ne peut pas faire pour une raison inconnue ou pour une raison logique) pour la transformer en un principe positif (une assertion sur ce que la nature est) fournissant ainsi les bases théoriques à l'explication des phénomènes initialement contradictoires. Le posi-

tivisme est souvent associé à l'idéalisme². Pourtant, il est clair que l'utilisation que nous faisons du positivisme (tel que brièvement expliqué ci-haut) instancie l'idée même de l'objectivité : Nous disons que quelque chose est d'une telle manière (objective) pour expliquer tels ou tels résultats (objectifs). La même utilisation du positivisme logique a été faite par Bohr dans la conception de la complémentarité décrite au chapitre 2. Plus particulièrement dans notre cas, l'impossibilité expérimentale (parce que l'on croit à la mécanique quantique) de prédire la position du corpuscule au-delà de son enveloppe de fonction d'onde est transformée positivement dans le principe qu'il ne peut y avoir de spécification de la position au-delà de celle donnée par la fonction d'onde ou le vecteur d'état. Nous concluons que, comme tous les résultats statistiques sont une conséquence directe de l'ensemble (et non des éléments), du potentiel quantique ou de la fonction d'onde (selon la préférence), le rôle réel de la particule bohmienne est radicalement remis en question. L'interprétation d'Everett utilise la même dynamique pour la fonction d'onde (celle de Schrödinger uniquement) et ne contient pas ces particules superflues. De ce fait, elle nous semble plus objective.

²Par exemple Berkeley [6] appartient à cette école. Ce dernier assume que, puisque tout concept est indissociable de la pensée et de son observation, alors toute la réalité n'est finalement que des idées, pensées, ou consciences.

Chapitre 5

L'observateur dans les lois de la nature

Dans ce chapitre, nous explorerons certaines hypothèses philosophiques au sujet de la nature des théories physiques. Plusieurs de ces idées sont incluses implicitement dans notre conception de la signification de l'interprétation de Copenhague. Le point où nous désirons arriver est que les principes d'une interprétation purement opérationnelle ne sont pas incompatibles avec une formulation universelle indépendante même si on ne peut échapper à la demande logique de diviser le monde entre observé et observateur.

5.1 Sur la nature des théories physiques

La transcendance des concepts classiques discutée en relation avec l'interprétation de Copenhague ouvre la voie, entre autres, à la question : comment cela est-il possible en premier lieu ? Comment peut-on avoir à réviser les concepts de la mécanique classique s'ils sont effectivement l'expression la plus claire de l'objectivité (voir la citation d'Heisenberg 2.1) ? Ce problème, nous croyons, provient de la manière dont une théorie physique est comprise, et celle-ci émerge certainement de la manière dont la physique est enseignée mais cette discussion particulière dépasse les objectifs de ce travail. Prenons un cas particulier afin d'illustrer la manière commune de comprendre une théorie établie. Par exemple, il n'est pas rare d'entendre que la nature est totalement déterministe. On observe effectivement une régularité dans le comportement des objets de la nature mais ce sont les théories qui décrivent cette régularité qui sont déterministes et non pas nécessairement la nature elle-même. L'erreur qui est néanmoins souvent faite est de comprendre la théorie comme étant la nature, ce qui exclut toute possibilité de révision. Cette erreur de conception s'étend aussi dans l'utilisation qui est faite de ces théories. Par exemple, lorsque l'on considère naïvement l'erreur faite sur une prédiction (peu importe la théorie mais considérons la mécanique classique), nous assumons toujours implicitement que l'erreur que nous faisons se retrouve

dans l'incertitude de la mesure expérimentale des conditions initiales, qui elles, peuvent être conçues arbitrairement précisément. Ainsi, nous disons : bien que je ne connaisse pas exactement la position et que cela limite mes prédictions, la nature, elle, connaît la position et n'a aucune limite à sa connaissance intrinsèque de son état en termes des concepts classiques. Jamais ne considérons-nous que les concepts eux-mêmes possèdent une incertitude par rapport à la réalité. Le choc vient toujours après coup lorsque la théorie est explicitement insuffisante pour expliquer certains phénomènes. Le fait qu'il apparaisse que toutes les théories actuelles sont limitées à un domaine particulier d'expérience devrait nous indiquer qu'il peut y avoir quelque chose de plus fondamental derrière cette limitation. En ce sens, il fait peu de sens de dire que la nature connaît les "vrais" paramètres qu'une théorie utilise. Ce problème est largement discuté par Bohm [8, chap. 25] qui signale que les théories physiques ont été, et sont toujours, trop souvent regardées comme des vérités éternelles. Pourtant, l'avancement de la physique moderne montre bien que les théories classiques, conçues initialement comme des vérités absolues, sont limitées à un domaine de validité et par conséquent, non absolues. De la même manière, la physique moderne est elle-même soumise à une révolution future de ses principes de telle sorte qu'il serait naïf de considérer les concepts qu'elle utilise comme étant de nouvelles vérités absolues de la nature.

For now we need no longer suppose that a scientific theory is either completely true, and therefore an "eternal verity", or else completely false, and therefore of no significance whatsoever. Rather, a law of nature is, by our very way of conceiving it, seen to express the fact that in a certain set of changes taking place in nature, as well as in a corresponding set of changes of points of view, reference frames, modes of investigation, etc., certain general relationships can be discovered, which remain the same throughout all these changes [8, p. 152].

Mais le point essentiel est que même une théorie limitée n'est pas fausse pour autant. La mécanique classique retient tout son contenu et sa signification physique dans les situations où elle est applicable. Mais où exactement est-elle applicable. Existe-t-il une règle générale pour déterminer si une théorie limitée est applicable ou non ? Cette question se rapproche évidemment de notre discussion à savoir s'il pourrait y avoir un effondrement objectif faisant le "pont" entre les concepts classiques et quantiques. La conclusion que nous devons tirer, pour les raisons qui suivent, est qu'une telle règle exacte ne peut exister.

Premièrement, si une telle chose existait, l'explication ne pourrait certainement pas se trouver dans les concepts de la mécanique classique. En eux-mêmes, ces concepts ne posent aucune limitation. C'est seulement dans la situation où nous faisons face à des faits expérimentaux transcendant l'explication d'une théorie que nous devons conclure à sa limitation. Ceci ne nous indique aucunement où cette limite se situe, seulement que la théorie est limitée dans la description et l'explication de la situation observée. Deuxièmement,

après des efforts titanesques récompensés par plusieurs prix Nobel, une nouvelle théorie (la mécanique quantique disons) décrit le comportement qui transcendait la première description. Soit cette théorie utilise un ensemble conceptuel complètement différent, soit certaines contraintes ont été relâchées sur l'ensemble conceptuel précédent, soit encore certaines entités, qui ne se manifestaient pas auparavant ou peu, ont été ajoutées à la théorie. Dans tous les cas, cet ensemble théorique modifié ne connaît pas plus ses limitations intrinsèques. Mais peut-on étudier les limitations de la théorie précédente dans ce nouveau contexte ? Nous considérons qu'il peut arriver trois situations ici, facilement représentés visuellement à la figure 5.1. Le fait que les lignes entourant les représentations concep-

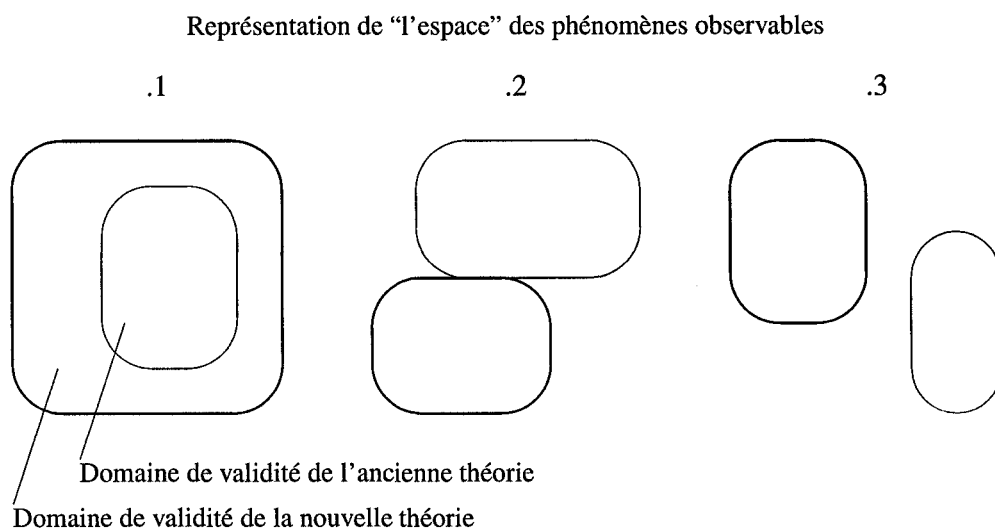


FIG. 5.1 – Représentation schématique de trois types de recouvrement entre deux théories

tuelles de la limitation des théories soient précises ne doit pas être compris comme ayant une signification réelle. Cette frontière est mieux comprise pour l'instant comme n'ayant aucune caractéristique puisque c'est justement à cette question que nous essayons de répondre. On pourrait classer les interprétations de la mécanique quantique selon le type de chevauchement entre les concepts classiques et quantiques qu'elles proposent. L'interprétation d'Everett et ses dérivées ainsi que l'interprétation bohmienne tombent dans la première situation où le contexte de la mécanique quantique est conçu comme englobant entièrement la mécanique classique. L'interprétation orthodoxe comprenant le postulat d'effondrement (frontière) de von Neumann et les interprétations à effondrement objectif [24, 35] seraient bien représentées par la deuxième catégorie, excepté que la bordure doit être considérée mobile dans le premier cas. L'interprétation de Copenhague ne tire aucune conclusion formelle sur la frontière ni sur l'universalité du formalisme (bien que nous ayons favorisé

une version universelle) mais elle n'est pas incompatible avec chacune de ces idées. Elle pourrait donc entrer dans n'importe laquelle de ces catégories, même la dernière qui proposerait qu'il existe certains phénomènes mésoscopiques transcendant les deux théories, ce qui n'est pas totalement farfelu. Le cas échéant où nous observerions de tels phénomènes, la nécessité d'une théorie unifiant les deux cas particuliers serait démontrée et nous nous retrouverions essentiellement avec une situation similaire au cas 1 dans lequel deux théories seraient incluses dans une plus générale. Nous n'avons pas inclus une situation où le recouvrement serait partiel car il nous semble impossible que deux ensembles conceptuels ne puissent s'expliquer l'un en termes de l'autre que partiellement. S'il y a le moindre recoupement général des principes, l'explication devrait s'étendre pour englober totalement une des théories. Dans tous les cas, nous sommes principalement intéressés par les deux premières situations. La deuxième est aisément traitée : un ensemble axiomatique mathématique ne fournit pas ces limitations intrinsèques par rapport à la nature. Ces limitations d'une théorie ne peuvent être montrées que par la comparaison entre des prédictions théoriques et des résultats de mesure expérimentale. Par conséquent, la frontière entre les deux théories représentées schématiquement ne peut être étudiée dans aucun de ces formalismes. On se retrouve donc ultimement à n'avoir qu'à traiter la première situation, c.-à-d. de se poser la question : est-ce qu'un formalisme plus général peut expliquer ou définir exactement quand une théorie plus restrictive est applicable ?

Considérons un exemple tiré de la mécanique classique. Prenons une situation où nous voulons décrire un objet rigide. Dans ce cas, nous savons que les méthodes de la mécanique classique nous permettent de décrire entièrement l'objet à l'aide de six degrés de liberté (trois de position et trois de rotation). La théorie des corps rigides est un cas particulier de la mécanique classique. La conception classique corpusculaire de la nature nous dit aussi implicitement que l'objet pourrait être décrit par N particules avec $N - 6$ contraintes de position relative (les contraintes de rigidité). Nous savons aussi que, bien que ces contraintes se présentent sous la forme de relations précises entre la position relative des différentes particules, la nature n'a pas cette précision rigoureuse en réalité, que ce soit parce que l'image d'une singularité ne convient pas à décrire les particules ou tout simplement parce que le corps est à une certaine température qui implique un mouvement aléatoire de ces degrés de liberté internes. Mais combien faut-il exactement de cette incertitude avant que la description macroscopique d'objet rigide ne convienne plus à la description de l'objet physique ? De toute évidence, il n'y a pas de critère autre que celui de "on garde la description pour autant qu'elle fonctionne expérimentalement". Cette demande est largement arbitraire et dépend des conditions dans lesquelles nous faisons l'expérience et de la durée de celle-ci. Par exemple, dans des conditions similaires, nous pouvons considérer le verre comme un

solide rigide sur de courtes périodes de temps. Par contre, si "l'expérience" s'étale sur des siècles, comme pour les vitraux des anciennes cathédrales par exemple, il est évident que le verre doit être vu comme un fluide ultra visqueux pour expliquer l'affaissement vers le bas (en forme de goutte d'eau). Il n'y a pas de moment précis à partir duquel le verre était solide et devient fluide. En fait, il est rigide dans tout intervalle de temps court et fluide sur les intervalles de temps longs et les méthodes qui doivent être utilisées dans la description de chacun des cas diffèrent drastiquement.

Noter qu'il n'a jamais été insinué que deux descriptions ne peuvent pas être englobées dans un seul et unique contexte théorique plus général. Mais même ce contexte plus général n'expliquera pas exactement quand nous pouvons utiliser un des ensembles de méthodes associés à un des sous-contextes plutôt qu'un autre. Il peut tout de même donner des indices. Par exemple, la présence de forces fortes de cohésion entre les particules constituant un objet est un bon indice de sa caractéristique d'être solide et rigide mais combien fortes doivent être ces forces et sur quelle échelle de temps l'approximation de la description en termes de corps rigide tiendra à seulement une signification par rapport au contexte de l'expérience.

Nous devons aussi reconnaître que nous avons de la difficulté à comprendre comment il pourrait en être autrement. Comment pourrait-il y avoir un critère naturel objectif pour connaître le moment où l'on doit changer de description de la nature sinon qu'une description ne fonctionne plus si on la sort trop de son domaine de validité ? Bohm est encore incisif sur la question

It must not be supposed, however, that we can eventually come to know the domain of validity of a given law *completely* and *perfectly*, and thus obtain another kind of absolute truth, which would assert that at least in a specified and well-defined domain, a given law is *always* applicable. [8, p. 152]

Après tout, le changement d'une théorie à une autre ne peut qu'être brutal et arbitraire car il n'y a pas d'entre-concepts. Par exemple, une ligne peut être quantifiée ou continue, mais peu importe la finesse de la quantification ou la façon dont la limite du continuum est atteinte avec des quantifications toujours plus fines, à un moment donné, on doit arrêter de considérer une quantification et parler de continuum et c'est seulement à ce moment que l'on peut vraiment utiliser toutes les méthodes mathématiques associées à ce paradigme. Ceci est un exemple de changement brutal, on aurait encore pu quantifier de plus en plus finement *ad aeternam* mais cela n'aurait que repoussé le problème d'avoir à changer d'ensemble conceptuel.

En définitive, la subjectivité de choisir quels types d'expériences on veut faire nous permet de choisir quels phénomènes on peut se permettre de "négliger" et quelle description physique on doit utiliser. Maintenant, la mécanique quantique nous fournit l'exemple parfait

du changement brutal entre deux descriptions de la nature. D'un côté, nous avons la description quantique des phénomènes microscopiques. Cette description fait intervenir tout un appareillage mathématique complexe mais considérons plus particulièrement la quantification, le principe de superposition et l'enchevêtrement comme étant les caractéristiques fondamentalement nouvelles et particulières à cette description. Du côté classique, nous avons que la description considère que les objets possèdent des variables objectives représentant leur état et l'idée d'enchevêtrement est simplifiée pour l'idée de corrélation unique entre certaines variables. La discussion précédente nous permet de relaxer l'idée de "réalité absolue" de ces descriptions physiques et on conçoit ainsi plus aisément que le changement de description n'a pas nécessairement à correspondre à un changement physique dans la réalité.

5.2 La description de la mesure dans les théories physiques

Dans cette section, nous explorerons un problème de la mesure en mécanique classique. La portée de ce problème s'étend apparemment à toutes les théories qui offrent une description de la nature. La résolution de ce problème de la mesure spécial nécessitera encore la postulation d'un changement d'ontologie apparemment largement arbitraire : le parallélisme psycho-physique.

Dans toutes les théories physiques, nous arrivons au concept d'état. Celui-ci peut être très différent de l'une à l'autre. Néanmoins, ces états ont comme point commun qu'ils représentent certaines caractéristiques du comportement de l'objet sous des mesures spécifiques dans des situations particulières. Les différents objets que la théorie permet de décrire possèdent parfois des états montrant certaines corrélations sous certaines mesures. Dans ce cas, certaines propriétés de l'état d'un premier système A sont "mappées" dans des propriétés spécifiques d'un deuxième, B . La connaissance de ces corrélations spécifiques permet de connaître certaines propriétés de l'état A si on connaît l'état de B . Les corrélations sont aisément écrites sous la forme $(a|b)$ signifiant que la propriété a de A est connue conditionnellement à la propriété b de B . Il est évident que, du point de vue de B uniquement, la connaissance implicite de son propre état b est insuffisante à la détermination de l'état de A . La connaissance de l'état b n'informe que sur B tant et aussi longtemps que nous ne possédons pas une règle d'interprétation de cet état, quelque chose qui nous dirait ce que l'état b représente en termes d'autre chose. Disons que l'information nécessaire, la connaissance de l'état de B et de la corrélation $(a|b)$, est une propriété du système C à la suite d'une succession de mesures (c'est la seule manière d'acquérir de l'information). Son état possède donc une corrélation à celui de B (ou englobe B directement) et à une propriété commune de

$A + B^1$. Cependant, du point de vue de C uniquement, son propre état est aussi insuffisant à la détermination de l'état A car il devrait aussi connaître la corrélation spécifique $(b|c)$ de son état avec l'état de B^2 et la corrélation $((a|b)|c)$ pour pouvoir interpréter son état en termes de l'état de B et ensuite en termes de A . Un système D n'arrangera guère les choses, ni E , ni F , etc. On pourrait imaginer plusieurs situations différentes mais le problème est toujours l'existence de corrélations extérieures au système qui a une connaissance implicite de son propre état. Cet état ne permet de tirer aucune conclusion à propos de l'état des systèmes extérieurs car l'interprétation est aussi extérieure. L'idée est plus aisément comprise par la représentation illustrée à la figure 5.2. Ce problème se traduit aisément en termes de

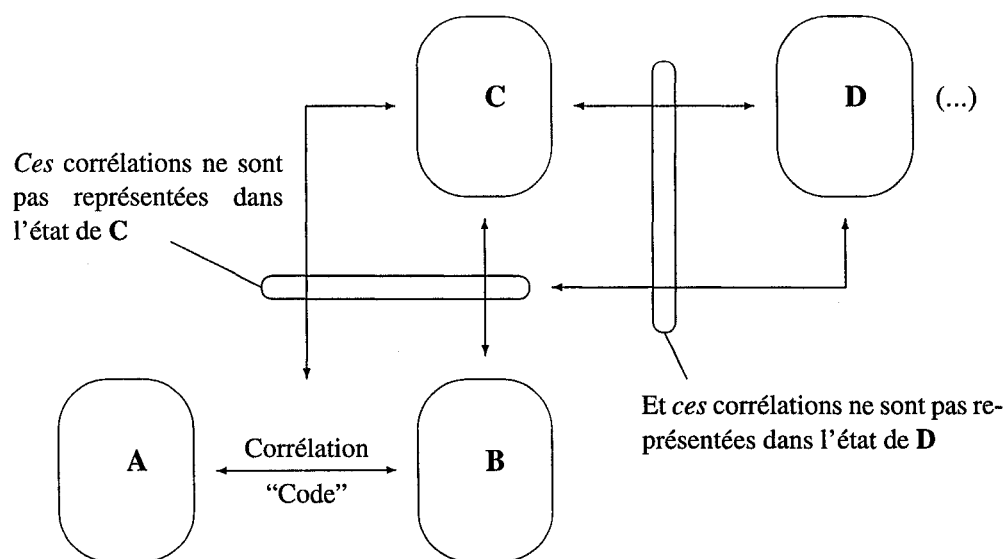


FIG. 5.2 – Relation entre différents systèmes corrélés

code. Nous cherchons à connaître certaines propriétés d'un système en regardant seulement celles d'un deuxième mais *il n'existe rien comme un message pur sans code* [28, p. 267]. Tout message a besoin d'une interprétation pour être lu et les systèmes A , B , C , etc., codés dans le langage de la théorie descriptive, sont analogues au message. Le code serait, lui, analogue à la connaissance de la corrélation spécifique mais nous avons ensuite besoin du code du code et du code du code du code car tout message ne peut être écrit que dans les propriétés d'un système, qui n'ont pas de signification en elles-mêmes, sauf pour un observateur extérieur à la théorie qui applique la théorie dans ses déductions. Selon ce point

¹La corrélation. La mesure d'une corrélation est aisément comprise en termes d'une mesure du système $A + B$ dans le passé. Les conclusions dépendent de la théorie utilisée.

²Dans le cas où le système C englobe physiquement le système B , cette corrélation est inutile car nous assumons que C peut connaître son propre état. B est alors implicitement connu.

de vue particulier, même la mécanique classique nécessite une interprétation extérieure au sens où une intervention arbitraire doit être faite à un moment pour que la chaîne de corrélation se termine.

Pourtant, quand nous regardons autour de nous, nous disons par exemple : “je vois une tasse”, “je sens telle chose”, etc. Est-ce que cela veut dire, assumant que l’observateur est le système C , qu’il possède un accès direct aux corrélations $(b|c)$ et $((a|b)|c)$ sans que ces corrélations soient actuellement mesurées formellement par C ? Car sans ces corrélations nous ne pouvons, en tant qu’observateur extérieur à cette scène, déduire l’état de A à partir de celui de C . Ce problème est résumé simplement en disant que toute représentation d’un état physique dans une théorie a besoin d’une interprétation, mais qu’il semble que la réalité de notre propre état, “*Cogito ergo sum*”³, n’a pas besoin d’une telle interprétation. L’observateur connaît son état comme un état ayant observé telles choses plutôt qu’un état ayant telles propriétés telles que décrites par une théorie physique.

Selon cette analyse, il semble inévitable que pour toute théorie descriptive, nous soyons amenés à conclure, dans l’analyse du processus de mesure en termes de la théorie, que tel ou tel état physique doit représenter un état de l’observateur ayant observé telle ou telle chose (terminer la chaîne). Le concept “d’avoir observé” est de toute évidence étranger à des théories descriptives telles que la mécanique classique et la mécanique quantique. Il fait plutôt partie de la “théorie” intuitive de la psychologie de l’observateur. Donc pour arriver à des résultats définis dans l’analyse du processus de mesure, il est nécessaire de faire un lien quelque part entre la description physique et la psychologie de l’observateur. C’est ce que l’on entend par parallélisme psycho-physique. Il résout le problème ci-haut en coupant la chaîne de corrélations, ce que nous représentons à la figure 5.3. Le changement d’ontologie nécessaire à l’analyse du processus de mesure dans une théorie descriptive est, en définitive, un changement de niveau de théorie. De ce fait, il est analogue au changement de description entre deux théories descriptives. Ce changement est effectué arbitrairement, lorsqu’une description ne convient plus ou, dans l’autre sens, lorsque qu’une description n’est plus avantageuse. Dans ce cas, le moment précis où un système est conscient et où il ne l’est pas n’est pas représenté ni dans la théorie descriptive (qui ne connaît même pas le concept d’avoir conscience) ni dans la théorie psychologique (qui ne connaît pas le concept de causalité). Mais dans le cas du changement d’ontologie entre la mécanique quantique et la mécanique classique, la question à savoir si la mécanique quantique englobe la description des systèmes aussi décrits par la mécanique classique (les systèmes macroscopiques) est encore débattue tandis que la validité de la mécanique classique à *décrire* les systèmes conscients est considérée implicite. Le programme de la décohérence vise, entre

³Je pense donc je suis.

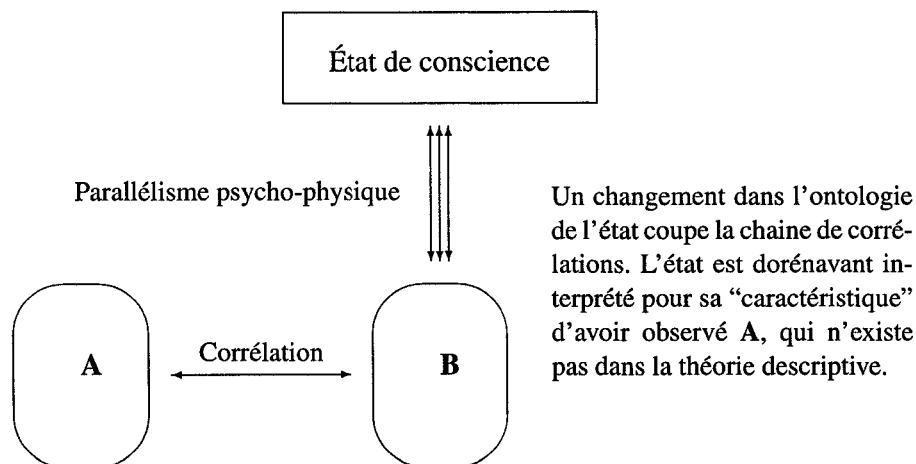


FIG. 5.3 – Le parallélisme psycho-physique

autres, à dissiper ce débat. Les succès de ce programme et l'absence de preuve empirique du contraire nous forcent à admettre que tous les systèmes connus possèdent un niveau de description quantique, même lorsque qu'ils peuvent être convenablement décrits par la mécanique classique au sens pratique. Le parallélisme psycho-physique doit s'appliquer aussi à cette description de la nature, *sans laquelle aucun résultat définitif ne peut être obtenu dans une analyse seulement intérieure au formalisme.*

5.3 Le parallélisme psycho-physique en mécanique quantique

On se rappelle que la conclusion qui a été tirée du programme de la décohérence est qu'un système macroscopique, inévitablement en interaction avec son environnement, tend à évoluer vers un mélange impropre (décrit par un opérateur densité local) représentant une coexistence de termes évoluant comme des objets indépendants (pas de leur contexte mais indépendants des autres possibilités) à cause de l'absence d'interférence dans la base de la position. Cette indépendance est approximative mais possède un très haut niveau de précision, de l'ordre de l'approximation que l'on fait lorsque l'on dit que l'entropie augmente toujours dans un système fermé. À titre de référence, elle a été évoquée pour une des premières fois par Bohm afin de justifier le comportement classique de ses corpuscules dans le cas où ils doivent décrire des situations classiques. Il écrit :

For the apparatus variable y will inevitably be coupled to a whole host of internal thermodynamics degrees of freedom, $y_1, y_2, \dots y_s$, as a result of effects such as friction

and brownian motion. [...] interference between packets corresponding to different values of q would be possible only if the packets overlapped in the space of y_1, y_2, \dots, y_s , as well as in y space. Such an overlap, however, is so improbable that for all practical purposes, we can ignore the possibility that it will ever occur. [7, p. 182]

De notre point de vue, ce commentaire est extrêmement justifié de la part de Bohm et il est une condition suffisante pour l'explication du comportement classique de son corpuscule. Cependant, cette conclusion ne repose aucunement sur la réalité de la particule mais seulement sur les propriétés de factorisation de la fonction d'onde et, en ce sens, la validité empirique de l'interprétation bohmienne sécurise la validité empirique de l'interprétation d'Everett, qui elle repose effectivement uniquement sur la fonction d'onde.

Il va donc de soi que nous devons explorer les conséquences de l'indépendance des termes de l'opérateur densité sur notre conception du parallélisme psycho-physique. En mécanique classique, le problème de savoir sur quoi devaient supervenir les états de conscience de l'observateur ne se posait pas parce que nous avions seulement une description pour chaque système. En mécanique quantique, la somme de deux descriptions est aussi une description valide (superposition). Dans ce cas sur quel genre de "somme" doit-on baser notre parallélisme ? Devant cette question et devant la possibilité que l'état puisse *ne pas être* une superposition et tout de même représenter un observateur, le parallélisme ne peut qu'être fait qu'avec les termes indépendants de l'opérateur densité local de la représentation de l'observateur. De même qu'une particule n'interagissant pas avec un détecteur ne peut pas être détectée, les autres termes de l'opérateur densité n'interagissant pas avec le terme qui nous intéresse ne peuvent pas intervenir dans l'explication de l'état de conscience que nous associons à ce terme. De manière générale, tout ce qui pourrait ne pas être là sans changer la description d'une situation particulière (une branche de la fonction d'onde) ne peut être l'objet de supervenience des propriétés de ce système à un autre niveau de description, que ce soit classique ou psychologique. Nous arrivons donc essentiellement au même constat qu'Everett, Zurek et les autres lorsqu'ils postulent implicitement un modèle de l'observateur dans leurs interprétations. Cette conception est essentiellement fonctionnelle.

La représentation de l'observateur à laquelle nous arrivons est donc en apparence très stratifiée comme on le montre à la figure 5.4. Plusieurs niveaux de théorie interviennent lors de l'analyse du processus de la mesure, car quoi que l'on fasse, les résultats expérimentaux doivent être exprimés dans un langage qui représente la réalité de l'individu et de ses expériences. Il est essentiel de remarquer que malgré tout le phrasage à propos des états de conscience de l'observateur et des perceptions subjectives d'un observateur conscient, la représentation ainsi donnée est totalement objective : il n'y a que la fonction d'onde comme réalité indépendante au niveau quantique. Mais comme la mesure classique ne peut pas être objectivée sans le niveau psychologique de l'observateur (il n'y a pas de message

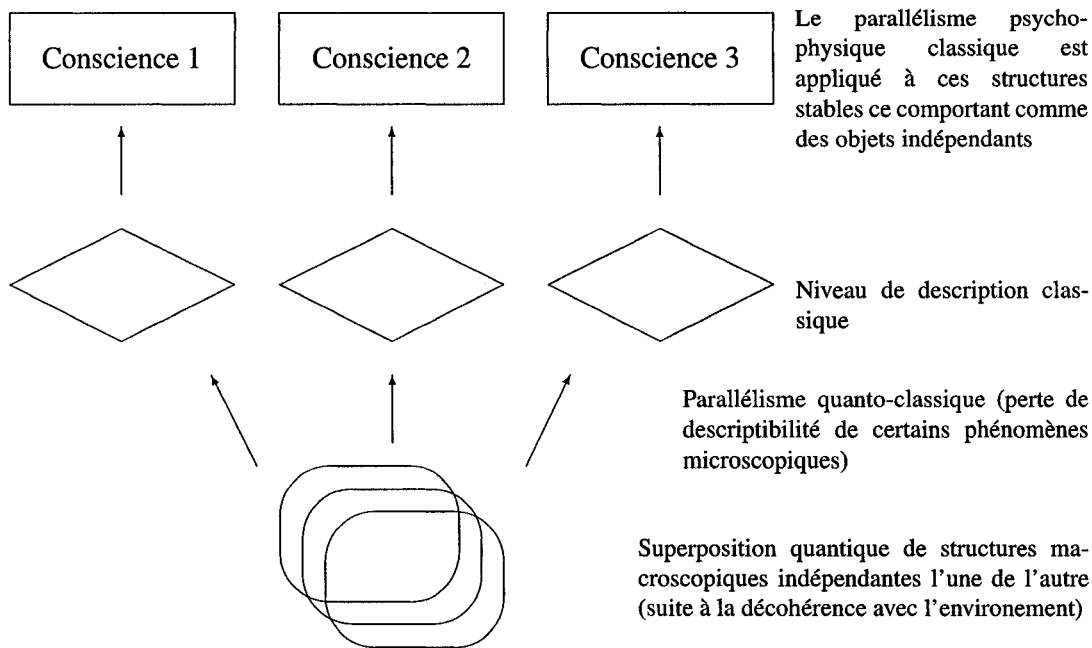


FIG. 5.4 – Le parallélisme quanto-classique et psycho-physique

sans code, il doit donc être décodé par une entité extérieure), la même analyse s'applique à l'observateur en mécanique quantique. Par rapport à une objectification, seules certaines corrélations sont observables (ou mesurables). C'est ce qui se rapproche du niveau de description classique au sens où on peut associer une ontologie classique à certaines structures quantiques et contempler que l'association est conservée, à toutes fins pratiques, lors de l'évolution du système dans les deux ontologies. Le paquet d'ondes du centre de masse d'une particule macroscopique reste localisé sur de longues périodes grâce à l'interaction suivie de l'environnement ("monitoring"), qui en retour affecte peu son comportement intrinsèque⁴. Les relations d'Ehrenfest [33, p. 127] sécurisent le comportement classique des objets dans les situations très particulières où l'état quantique se présente sous la forme de paquets d'ondes localisés.

Le portrait du parallélisme psycho-physique ainsi dressé est fertile à l'interprétation d'Everett. L'interprétation d'Everett assume l'objectivité totale de la fonction d'onde sans que celle-ci soit d'abord interprétée comme fournissant un lien probabiliste entre des mesures classiques. Cette interprétation émerge du fait que certaines structures se prêtent au parallélisme avec d'autres niveaux de théorie comme l'illustre la figure 5.4. Aucune cause ne peut être attribuée au fait que l'état de l'observateur soit l'un ou l'autre des états de

⁴Doit-on rappeler que la décohérence est une perturbation que l'objet macroscopique *cause* dans l'environnement, et non le contraire, sauf dans les cas où le système est très sensible, auquel cas la perturbation aléatoire se manifestera dans le mouvement brownien de la particule.

conscience possibles sans violer la mécanique quantique orthodoxe⁵. Nous pouvons seulement, en tant qu'observateur appartenant à une de ces possibilités, contempler le domaine des possibilités du résultat futur d'une mesure et remarquer que certaines sont plus "probables" que d'autres de telle sorte que l'interprétation orthodoxe soit applicable. La discussion de la déduction de la loi de probabilité du formalisme quantique dépasse ce travail. Certainement que ce genre de déduction est circulaire car le formalisme standard demande l'interprétation probabiliste d'entrée de jeu. Cependant, le fait que l'outil mathématique décrivant quantitativement le comportement de la réalité everettienne doit être interprété comme une amplitude de probabilités est initialement indépendant des principes sur lesquels l'interprétation d'Everett repose : le principe de superposition et l'enchevêtrement. On peut donc imaginer une situation où l'interprétation d'Everett est *vraie* et où l'interprétation des probabilités est suppléementée opérationnellement par la suite. L'interprétation d'Everett nous fournit donc un modèle de la réalité objectif et indépendant de l'observateur satisfaisant nos demandes quant à l'objectivité des processus naturels. Cependant, une mesure concrète, une expérience de laboratoire ou une simple observation doit être analysée en termes de cette théorie objective pour montrer des résultats sensés, uniques et définis. Les liens entre la théorie quantique, la mécanique classique et la psychologie de l'observateur sont faits à l'aide du concept de parallélisme de niveau de description. Le parallélisme reconnaît que la nature ne possède pas implicitement les propriétés que les théories proposent, mais se comporte telle que représentée dans une théorie, à une certaine échelle de précision qui ne peut être analysée que par l'expérimentation.

Malgré le portrait reluisant qui a été présenté ici, des objections ont été dressées contre le parallélisme psycho-physique en mécanique quantique. Par exemple, Bell écrit que

[...] a human observer is no trouble (in principle) in classical theory – he can be included in the system (in a schematic way) by postulating a 'psycho-physical parallelism' – i.e., supposing his experience to be correlated with some function of the coordinates. This is not possible in quantum mechanics, where some kind of observer is not only essential, but essentially outside. [5, p. 125]

À tout ce genre d'objections, on ne peut qu'insister sur le fait que c'est justement l'objectif des interprétations à *la* Everett de reproduire les postulats de "l'observateur extérieur orthodoxe" par une analyse de l'interaction entre les systèmes à l'intérieur du formalisme de base. Nous acceptons que le formalisme puisse être, en définitive, un moyen de calcul ne représentant aucune réalité pictorielle mais même dans ce cas, il y a le fait que ce formalisme décrit un comportement particulier de la nature, quelque chose de réel. C'est à cette "chose" que nous essayons de penser lorsque nous utilisons le formalisme. Aussi nous ne pensons

⁵Car une telle spécification serait supérieure à l'information donnée par la fonction d'onde dans les interprétations orthodoxes.

pas en termes de probabilité et de postulat de mesure mais plutôt en termes d'une entité qui évolue de manière déterministe dans un espace particulier, et dont les relations font en sorte que certaines structures représentent des observateurs ayant des états de conscience particuliers. L'idée du parallélisme psycho-physique est ici introduite pour les mêmes raisons qu'il l'est en mécanique classique excepté que le système observateur ne peut être dissocié logiquement des autres à cause de l'enchevêtrement. Toute connaissance subjective que l'observateur possède sur un système implique qu'il y a un enchevêtrement physique objectif entre l'observateur et ce système observé. Le reste des conséquences de cette réalité est compris en relation avec ces structures-observateur. Entre autres, les postulats de mesure orthodoxes *comme si la fonction d'onde n'était qu'un outil* doivent être applicables. Les relations statistiques sont la limite de la connaissance de la connexion entre un état présent de l'observateur et son état futur décrit en termes classiques (un niveau de description) mais suivant une dynamique quantique.

Terminons cette section en résumant ce qui a été accompli jusqu'à maintenant. Dans la première section, nous avons relaxé l'idée de réalité absolue décrite par les théories, qui sont dorénavant comprises comme des descriptions d'un certain ensemble de phénomènes. En ce sens, il peut y avoir des niveaux de théorie, des théories qui englobent d'autres théories sans que cela affecte la réalité accordée à chacune d'entre elles. Deuxièmement, nous avons montré qu'il existe un analogue au PM en mécanique classique dont la solution nécessite la postulation du parallélisme psycho-physique. De la même manière, la solution du PM avec l'interprétation d'Everett nécessite aussi l'introduction du postulat du parallélisme psycho-physique et celui-ci doit être fait d'une manière très précise pour être consistant avec le principe de superposition et la décohérence. L'étude des statistiques de la mécanique quantique repose sur l'existence d'entités subissant des "faits" uniques et définis telles que données par le postulat du parallélisme psycho-physique et isolées par la décohérence. Nous aurons dorénavant tous ces concepts en tête lorsque l'on concevra l'interprétation d'Everett.

Chapitre 6

Application du positivisme logique

6.1 L'objectivité du positivisme

L'application du positivisme logique a implicitement affecté toutes les sections de ce travail. Cet outil théorique est l'opération mentale qui permet, dans un contexte donné, de reconnaître une fausse question, un paradoxe, ou quelque chose qui ne peut être défini (négatif), et de le transformer en un principe sur ce que la nature *est* (positif). Le résultat de cette opération est que ce qui apparaissait paradoxal dans le premier contexte peut maintenant être expliqué non paradoxalement dans le nouveau contexte, avec le nouveau principe, qui libère la contrainte sur des nouvelles prédictions que l'on ne pouvait faire avec l'ancienne ontologie. Car il est essentiel de reconnaître que tant et aussi longtemps que l'on prenait la question initiale comme paradoxale, le schéma interprétatif se contentait seulement d'énoncer le problème. L'inclusion d'une solution au problème "apparent" comme nouveau principe fournit les bases pour une théorie de la nature complètement nouvelle où d'autres phénomènes peuvent être attendus. La vérification expérimentale de ces nouvelles prédictions sécurise les nouveaux postulats. Toute la structure de la physique moderne repose sur cette philosophie pratique qui explique pourquoi quelque chose qui ne peut être défini opérationnellement ne peut faire partie de la réalité. Car si une chose ne peut être définie, c'est que la nature a une raison intrinsèque pour que cette chose soit indéfinissable, fournissant ainsi un nouveau principe dans lequel la question de définir telle ou telle quantité ne se pose même pas. Si en retour, elle peut l'être en principe mais que la technologie n'est simplement pas assez avancée, le nouveau postulat sera éventuellement convenablement rejeté ou confiné à un domaine particulier. Ultimement, tout ce qui n'est pas définissable opérationnellement est retiré de la théorie et seul persiste ce qui a une relation directe avec les résultats de mesure. Le fait que nous ne possédons jamais une théorie finale de la nature explique pourquoi, jusqu'à maintenant, nous avons toujours rencontré de fausses questions,

des questions qui se formulent en termes d'une théorie, dont les concepts sont fondamentalement ambigus, mais qui ne font aucun sens par rapport à la nature.

Par exemple, la situation présentée au début du siècle dans le contexte de la relativité était telle que seule l'application du positivisme logique pouvait nous sortir de l'ontologie classique du référentiel absolu.

The special theory of relativity states that there is, up to the present, no means of transmitting signals with a velocity greater than that of light. Hence, it is impossible to give a clear definition of an absolute time-scale. This, however, is a negative statement. Only the supposition that it is *in principle* impossible to transmit signals with a speed faster than light, and arising from this the postulate of the constancy of the velocity of light, makes possible a logically satisfying ordering of experiences. It is only this second positive step that justifies the statement that the question of an absolute time-scale is a 'false' question. [26, p. 46]

Et parmi les conséquences de ce bond théorique se retrouve la fameuse relation d'Einstein entre la masse et l'énergie qui était totalement inconcevable suivant l'ontologie classique de l'espace et du temps. En effet, la théorie de Lorentz montrait la même invariance de la vitesse de la lumière sous une mesure dans différents référentiels par rapport à l'éther que celle montrée par la théorie de la relativité, qui postule l'invariance au départ. Dans la théorie de Lorentz, les longueurs des règles en mouvement étaient conçues comme physiquement contractées et les horloges physiquement ralenties par rapport à leurs homologues au repos dans l'éther. Mais les concepts d'impulsion et d'énergie cinétique, eux, restaient essentiellement les mêmes. La dérivation correcte de ces quantités relativistes grâce au principe de relativité est la première étape de la dérivation générale de la relation d'équivalence masse-énergie, ce qui met en relief que la relation est effectivement apportée par la révision de la conception de l'espace-temps [23].

Le positivisme logique doit aussi être appliqué dans la conception de l'entropie. L'entropie est souvent comprise comme une mesure du désordre ou une mesure de l'information manquant à la spécification totale du système (en termes classiques, disons). Cependant, il est évident que de telles explications relèvent d'un langage subjectif à un observateur. Désordre et information ne sont pas des concepts d'une théorie descriptive de la nature telle que la mécanique classique. Du point de vue de la mécanique classique, la nature "connaît" toute l'information sur son état et est microscopiquement totalement réversible dans son ontologie. Cependant, la quantité thermodynamique que l'on connaît sous le nom de l'entropie doit nécessairement être objective et indépendante de l'observateur. Par exemple, les processus physiques où la variation d'énergie libre de Gibbs d'un système fermé à température constante ($\Delta G = \Delta H - T\Delta S$) est négative sont spontanés, ceux pour lesquels elle est positive se produisent naturellement dans la direction inverse et ceux dont la variation est

nulle sont à l'équilibre. Qu'un système subisse l'une ou l'autre de ces trois situations est nécessairement un fait observable de la nature. Il est donc évident que la variation d'entropie S qui intervient dans la détermination de cette situation doit être factuelle et ne représente pas un état d'ignorance subjectif sur des degrés de liberté classiques. Seul le postulat de la deuxième loi de la thermodynamique décrit le caractère objectif associé à l'entropie d'un système. L'entropie augmente toujours naturellement. Ce postulat est un exemple de limitation de la description classique réversible.

Au chapitre 2, nous avons amplement insisté sur le fait que la mesure de propriétés complémentaires, qui apparaît dans le schéma de la mécanique classique comme un choix arbitraire de certaines propriétés objectives des systèmes, n'avait en fait rien à voir avec la subjectivité. Encore une fois, le positivisme logique a été appliqué pour passer de l'idée où il est impossible de mesurer expérimentalement la position et l'impulsion avec une précision arbitraire (comme si cela était simplement une limite sur la mesure et non sur les concepts) à l'idée qu'il ne fait aucun sens de concevoir la position d'un objet simultanément à son impulsion au delà d'une certaine précision. Cependant, la première introduction aux relations d'Heisenberg est, malheureusement, toujours expliquée en termes d'une ontologie classique et d'un échange d'énergie aléatoire. Pourtant, il est évident que l'ontologie classique ne représente pas la réalité du monde microscopique. Encore une fois, nous ne pouvons qu'être émerveillés par l'acuité d'Heisenberg, qui reconnaît que ses relations doivent être comprises comme principes

The restrictions of classical concepts as enunciated in the uncertainty relations acquire their creative value only by making them questions of principle. They then afford the freedom necessary for an harmonious and non-contradictory ordering of our experience. Only the system of mathematical axioms of wave mechanics entitles us to class the question of position and impulse as a 'false' problem. [26, p. 47]

“Complémentarité” est le terme que Bohr a choisi pour rendre compte de ce nouveau principe de la nature, instancié quantitativement dans les relations d'incertitude d'Heisenberg, pour lequel les demandes contradictoires de l'ontologie classique devaient être effacées.

Au chapitre 4, nous avons clairement rejeté l'interprétation bohémienne sur les bases du positivisme logique. En particulier, la position de la particule doit être fondamentalement inconnue (dans les limites du paquet d'ondes décrit par $\Psi(x, t)$) pour reproduire les prédictions de la mécanique quantique¹. Les propriétés de ces particules (selon l'ontologie classique) ne peuvent donc pas être définies opérationnellement et donc, n'apportent aucun lien avec les phénomènes observés. L'étape positiviste est donc d'abandonner ces particules indéfinissables et de garder seulement leurs statistiques inhérentes qui font le lien entre les

¹Si elle ne l'était pas, les relations d'incertitude d'Heisenberg pourraient aussi être violées dans le futur [7, p. 179]

faits observables comme étant une nouvelle propriété objective de la nature, quelque chose d'irréductible. C'est aussi seulement à ce prix que nous pouvions comprendre l'interprétation de Copenhague comme fournissant une description complète de la nature, car il n'y a désormais rien de plus à décrire. Ces hypothèses sur la nature ne peuvent qu'être confirmées par une vérification expérimentale des conséquences qu'elles impliquent.

Toutes ces explications suffisent, à notre avis, à montrer à quel point le positivisme logique insiste sur l'objectivité des lois naturelles et est, par le fait même, diamétralement opposé à l'idéalisme ou au solipsisme, avec lesquels il est parfois associé. Mais si l'interprétation de Copenhague est effectivement le résultat de l'application intensive du positivisme logique, pourquoi se contente-t-elle de ne fournir que des résultats en termes de concepts classiques ? Une interprétation basée entièrement sur le positivisme ne devrait-elle pas être basée que sur des postulats et des propositions qui disent ce que la nature *est* ? Cette réalité indépendante pourrait être très différente de notre préconception de la réalité et expliquer de manière non paradoxale les limitations de l'utilisation des concepts communs de l'expérience obtenus comme des cas limites.

La question de la réalité indépendante telle que donnée par le formalisme de la mécanique quantique est très controversée. Bohr, avec l'interprétation de Copenhague, voyait le formalisme comme donnant uniquement la connexion entre les concepts classiques révélant une réalité qui transcendait totalement l'applicabilité de ces mêmes concepts, mais que la description de tout fait expérimental devait faire intervenir. Cependant, ce même formalisme forme l'ensemble conceptuel quantitatif permettant d'expliquer la quantification des niveaux d'énergie et, ce qui est plus important encore, la stabilité de la matière. Ces niveaux d'énergie, ou la quantification plus généralement, ne sont pas une sélection de certaines possibilités parmi une infinité d'autres mais un abandon de concevoir des états physiques entre les états quantiques. C'est seulement lorsque les états quantiques deviennent une question de principe que la stabilité de la matière peut être expliquée². Ces états sont décrits par une solution de l'équation de Schrödinger, qui se doit, par conséquent, de *représenter* une réalité objective. Elle n'a pas à être la réalité, elle doit seulement la représenter symboliquement de la même manière que l'ensemble des concepts de la mécanique classique représente symboliquement la réalité à cette échelle (nous élaborerons ce point plus loin). Mais comme toute bonne représentation, on s'attend à ce qu'il y ait une bijection entre le comportement des objets de la théorie et celui de ce que l'on peut définir, toucher, ajuster, etc. C'est seulement au prix que la représentation fasse intervenir explicitement les concepts classiques dans sa

²La mécanique bohémienne ramenait ces états physiques dans la réalité. Cependant, toutes modifications de la mécanique bohémienne violant le principe d'incertitude rendraient aussi la matière instable en principe, ce qui falsifierait les modifications de la mécanique bohémienne. C'est aussi pour cette raison que le concept du corpuscule ontologique classique doit être abandonné : il ne possède aucun lien avec cette stabilité.

définition que nous pouvons espérer une réponse précise lorsque l'on pose une question du genre : où, quand, à quelle vitesse, etc. ce qui ne veut pas dire que toutes ces questions *peuvent* être posées. Parfois elles sont vides de sens.

6.2 Le positivisme logique vs. les mondes de l'interprétation d'Everett

Au chapitre 3, nous avons dressé le portrait des “mondes” dans une interprétation d'Everett basée sur la décohérence. Ces “mondes” sont représentés par des structures dans l'espace de Hilbert des macrovariables ne possédant que certaines corrélations très spécifiques entre elles. Les corrélations de macrovariables qui ne sont pas détruites par l'interaction avec les microvariables de l'environnement sont celles pour lesquelles l'hamiltonien d'interaction avec l'environnement commute avec les projecteurs correspondant à ces macrovariables. La destruction des autres corrélations inhibe les effets d'interférence. C'est seulement dans ce cas que l'on peut parler de “mondes” qui sont, à toutes fins pratiques, indépendants les uns des autres et pour lesquels les macrovariables se comportent comme celles des objets classiques, pouvant être objectivisés et traités séparément, dans une certaine limite de précision.

Mais quelle est l'importance réelle de ces “mondes” s'ils ne doivent pas interagir avec l'actualité pour assurer le fait que les objets macroscopiques se comportent comme des objets classiques ? Ne risquent-ils pas, pour la même raison que les particules bohmiennes devraient être abandonnées parce qu'elles ne fournissent aucun lien avec les résultats de mesure futurs, être abandonnés eux aussi puisqu'ils ne doivent avoir aucun effet sur l'actualité ? En fait, il y a au moins deux différences majeures entre les mondes de l'interprétation d'Everett et les particules bohmiennes dans cette situation. Premièrement, les particules bohmiennes doivent, par principe, être inconnues sans quoi le principe d'incertitude pourrait être violé tandis qu'il est possible, par une préparation d'état adéquate, de connaître schématiquement une portion de la fonction d'onde future de l'univers et ainsi, une partie de l'embranchement des “mondes”. La fonction d'onde dans l'interprétation d'Everett est la spécification complète du système et elle nous renseigne également sur l'évolution de tous les autres mondes indépendants pour lesquels cette mesure est une actualité. Deuxièmement, l'existence objective de ces “mondes” n'est pas infalsifiable en principe. La décohérence explique pourquoi, dans une situation où l'interaction avec l'environnement est incontrôlée, l'effet des autres “mondes” est nécessairement négligeable. Cependant, elle ne

fournit aucune limite sur l'observation des phénomènes quantiques, de sorte qu'une situation où ces phénomènes échoueraient à se présenter là où ils devraient vraisemblablement être présents falsifierait l'interprétation et serait sans doute un grand pas indiquant la voie vers une modification cohérente de la théorie quantique. Nous avons mentionné précédemment que certains, comme Penrose [35, p. 298], voient en l'absence d'observation de superpositions macroscopiques un signe que la mécanique quantique échoue à la description de la réalité au niveau macroscopique. Cependant, bien que l'absence de telle superposition dans les observations courantes comme la localisation d'une balle de tennis soit une observation valide pouvant falsifier une théorie, de telles observations sont insuffisantes pour invalider l'interprétation d'Everett, ou n'importe quelle autre interprétation, car l'observation d'un objet localisé se comportant classiquement est précisément ce que l'interprétation prédirait dans un tel cas. Dans cette situation, la théorie s'en retrouve vérifiée et non le contraire. En fait, l'observation d'un objet macroscopique en superposition dans une situation commune est une des choses qui falsifierait l'interprétation d'Everett, qui prédit l'absence de telles choses. L'effet des "mondes" est donc lié directement à notre capacité en tant qu'observateurs et expérimentateurs, à pouvoir préparer et contrôler des systèmes avec une très grande précision.

Il est essentiel ici de bien comprendre que les "mondes" de l'interprétation d'Everett ne sont pas les concepts à la base de la théorie quantique mais émergent en raison de la description microscopique et du besoin d'unifier les champs d'expérience. En effet, si la nature est véritablement quantifiée au niveau microscopique et que l'énergie à cette échelle s'échange toujours en quanta, il doit en être toujours de même au niveau macroscopique, excepté que le quantum est d'autant plus négligeable que les énergies en jeu sont élevées. Et ainsi, les principes de la théorie quantique doivent toujours y être applicables, ce sont les mêmes atomes, la même énergie, etc. Notre conception du positivisme nous amenait à demander que tous les principes et concepts de la théorie soient en lien direct avec l'expérience et qu'il soit possible, en conséquence, de les définir par une procédure opérationnelle de mesure. Mais les "mondes" ne sont pas de tels principes ou concepts. On ne peut pas sélectionner un "monde" à l'aide d'un appareil de mesure car le concept de "monde" inclut les relations entre l'appareil qui ferait la sélection (le cas échéant), l'observateur extérieur, son environnement, etc. On peut au mieux sélectionner l'état d'un sous-système et observer les conséquences de l'évolution sous différentes conditions. D'une manière quelque peu similaire, on ne mesure pas l'espace-temps dans une expérience, seulement la relation entre certains événements. La croyance ferme en la réalité de cette entité repose donc essentiellement sur les relations qu'elle fournit. La structure de la fonction d'onde globale prédit des relations où les phénomènes quantiques sont présents pour des phénomènes microscopiques.

piques cohérents et des relations où ils sont absents entre des objets macroscopiques. Il n'est peut-être pas étonnant que les "relations" aient une importance aussi prédominante dans une interprétation initialement appelée "l'interprétation des états relatifs" !

6.3 Copenhague vs. Everett

Il va sans dire que le portrait qui a été dressé de l'interprétation de Copenhague est très différent de celui de l'interprétation d'Everett. Entre autres, la fonction d'onde de la première est comprise comme étant une représentation symbolique de l'état microscopique tandis que l'autre représente une réalité objective. Pourtant, l'analyse du processus a toujours généré l'impression que les deux interprétations sont en définitive deux points de vue de la même réalité. Par exemple, en conclusion de l'analyse de son interprétation existentielle, Zurek écrit que

In spite of the Everett-like framework of this discussion, the picture that emerges in the end—when described from the point of view of an observer—is very much in accord with the views of Bohr : A macroscopic observer will have recording and measuring devices that will behave classically. [53, p. 90]

L'interprétation de Copenhague décrirait seulement un monde, acceptant le "confinement" des relations entre les objets et l'observateur, tandis que l'interprétation d'Everett décrirait la vraie histoire des choses, plus tangible et toujours causale. Cependant, l'idée de considérer la représentation comme objective et indépendante n'est-elle pas seulement un moyen d'alléger la représentation mentale que nous devons nous faire des objets physiques ? Il y a ici un parallèle très intéressant à faire avec la conception classique de la matière. La révolution quantique a montré que l'on ne peut attribuer de manière objective des propriétés (classiques) complémentaires à des objets que l'on concevait précédemment comme "possédant" ces caractéristiques en soi. Il est donc suffisamment clair que la conception de la matière comme objet possédant des propriétés en soi doit, de toute manière, ne pas être totalement adéquate. Cependant, il n'en demeure pas moins que l'on peut toujours utiliser ces mêmes concepts de manière univoque dans la résolution de problèmes physiques classiques, dans la prédiction de résultats futurs sur des systèmes macroscopiques, etc. Mais il est désormais clair que les véritables vertus de ces concepts sont les relations qu'ils nous donnent entre les états passés, présents et futurs de ces systèmes (dans un certain domaine de validité bien sûr). Cependant, en toute conscience de ces limitations, nous pouvons continuer à utiliser le formalisme classique comme s'il représentait une forme de réalité transcendante de la matière : que les objets "ont" une position, qu'ils "ont" une impulsion, etc. Lorsque l'on compare l'interprétation de Copenhague à l'interprétation d'Everett, nous nous retrouvons

essentiellement avec le même changement de paradigme. Les deux interprétations fournissent les mêmes prédictions dans la mesure où ces prédictions réfèrent à une procédure de mesure complète. Elles divergent seulement par rapport à leur contenu métaphysique. C'est justement par rapport à ce contenu métaphysique que nous comparons leurs relations à celle de la conception pré et post-moderne de la mécanique classique. L'interprétation d'Everett assume, comme nous l'avons dit, que la fonction d'onde est une nouvelle forme de réalité. Ce que nous appelons système possède un état et cet état est une fonction d'onde. La fonction d'onde évolue selon une équation déterministe et ainsi de suite. Cependant, comme on l'a défendu à la première section du chapitre précédent, il serait naïf d'attribuer une réalité transcendantale à l'état quantique compte tenu de la révolution conceptuelle qui a été nécessaire au passage vers cette mécanique quantique. La manière la moins naïve de procéder s'effectue donc en reconnaissant 1) la validité de l'application du formalisme de la mécanique quantique et 2) l'inévitabilité d'une révolution future. Cette méthode offrira des procédures qui définiront certaines relations observables. Le fait qu'une interprétation à la Everett formulée en termes d'une réalité objective indépendante soit possible est attribuable aux mêmes raisons pour lesquelles l'interprétation du formalisme classique en termes objectifs est possible bien qu'il ne soit pas une vérité universelle absolue. D'un autre côté, puisqu'il semble que la seule chose vraiment importante dans les deux interprétations soit les relations entre les événements, il peut être tentant d'assumer que ces relations sont en fait la seule réalité. L'interprétation relationnelle assume cette hypothèse [41]. Évidemment, une telle interprétation ne sera pas en contradiction avec les faits. Cependant, elle est tout aussi naïve au sens où les relations sont maintenant, elles aussi, comprises comme la seule vérité, comme une réalité transcendantale et, en plus, elle nie l'importance du concept de support matériel des relations³. L'interprétation de Copenhague réussit à éviter cette naïveté en assumant que la fonction d'onde est une représentation symbolique, non picturale, de l'état c.-à-d. que, bien que nous croyions en la réalité de l'objet en tant que chose appartenant au monde physique, nous ne pouvons que posséder une connaissance du comportement de cette chose dans certaines conditions spécifiées et non de sa nature profonde.

Il semble donc qu'il y a un parallèle intéressant à faire entre l'interprétation de Copenhague et l'interprétation d'Everett. Cette dernière nous apparaît comme étant formulée d'une manière analogue à la formulation de la mécanique classique avant la révolution quantique. Nous affirmons que, bien que cette manière de voir la nature soit valide dans

³Le concept de matière, ou de support matériel, est ici compris dans un sens très large. L'étude de la physique vise supposément à trouver des relations dans son comportement, et celui-ci est défini par rapport à ces relations. Nous ne possédons pas d'axiome sur la matière et ainsi, toute tentative de définition est circulaire à la théorie qui définit ces relations. Par exemple, que la matière soit constituée de points mathématiques ayant une position et une impulsion convenait à la mécanique classique et la majorité des relations observables pouvaient être expliquées dans ce paradigme.

un certain domaine, l'association d'un formalisme mathématique à la nature est intrinsèquement limitée. L'interprétation de Copenhague présentée ici contourne ce problème en admettant la nature opérationnelle de l'utilisation de la théorie. Cependant, nous ajoutons qu'elle ne peut le faire de manière consistante qu'en appliquant la même philosophie au domaine classique, duquel elle utilise les concepts dans la formulation opérationnelle du problème. C'est vraiment seulement à cette étape que l'on évite de concevoir une création de propriétés objectives classiques contradictoires lors de mesures complémentaires. Une telle création est nécessairement paradoxale à notre conception d'objectivité et de "faits de la nature". Évidemment, les "faits de la nature" doivent aussi être pris avec un grain de sel et être capables d'assumer l'incertitude des concepts avec lesquels ils sont exprimés.

There is another theory which states that this has already happened.

—Douglas Adams

Chapitre 7

Conclusion

Le problème de la mesure soulève plusieurs questions sur nos conceptions du monde. On pourrait même conclure légitimement qu'avoir une conception du monde est seulement chercher à la renverser et que finalement, nous serions aussi bien de nous contenter des théories qui fonctionnent sans plus. Cependant, nous voulons plus que cette complaisance excessive. Résumons donc les étapes par lesquelles nous sommes passés dans notre confrontation de l'interprétation d'Everett au positivisme logique.

1. Nous avons conclu à l'objectivité de la description donnée par une application rigoureuse du positivisme logique car, idéalement, tout principe physique est directement basé sur les observations. L'introduction de nouveaux postulats ou la modification de ceux déjà en place doit donc avoir des conséquences observables sans quoi le paradigme sur lequel repose ce principe ou postulat n'est pas fondé. Qu'il soit effectivement présent ou absent dans ce cas relève ici seulement de croyances métaphysiques invérifiables. Il est donc absent à toutes fins objectives. C'était le cas de l'idée du référentiel absolu. C'était aussi le cas de la particule bohmienne qui ne peut dépasser la connaissance donnée par les statistiques quantiques sans quoi les observations seraient différentes.
2. Pour une interprétation du type de l'interprétation de Copenhague, l'observateur est implicitement au centre de la description puisque tous les faits décrits par la théorie sont des faits observés. Cependant, on croit à la description comme *représentant* une réalité objective car, jusqu'à maintenant, seule la description quantique explique des phénomènes naturels comme la stabilité de la matière, l'effet tunnel, etc. Par contre, dans une description indépendante de l'observateur, les éventuels systèmes observateurs sont décrits dans le même langage que les autres systèmes et ne connaissent donc pas les concepts d'observateur, de mesure et de résultat. Nous avons vu que le parallélisme psycho-physique permet d'introduire ces concepts dans

l'analyse physique d'une situation de mesure et permet de conclure que tel ou tel phénomène est observé par l'observateur. La relation entre la description physique, qu'elle soit classique ou quantique, et le niveau psychologique de l'observateur est une relation de changement d'ontologie de description. Une description lamellaire (différents niveaux d'ontologie) est donc essentielle à l'analyse de l'observation dans une interprétation du type de celle d'Everett.

3. Pour l'interprétation de Copenhague, la question à savoir quelle valeur x d'une observable \mathcal{X} sera mesurée, par l'absence de cause sous-jacente, relève des statistiques. Elle nous dit aussi que le concept même représenté par cette observable (propriété classique) ne possède pas une existence indépendante de la mesure et seule la situation expérimentale permettant sa mesure permet l'attribution de relations faisant intervenir cette propriété classique intrinsèquement limitée. Cette absence de cause (réponse négative) est traduite par la négation de la question dans l'interprétation d'Everett. La question à savoir quelle actualité ne fait aucun sens dans ce contexte où toutes les branches sont actuelles et l'ensemble des branches évolue causalement. Entre autres, l'interprétation d'Everett nous dit aussi pourquoi on peut seulement attribuer des propriétés classiques dans des situations où ces propriétés sont effectivement mesurées car, à ce moment, la décohérence est sûre d'avoir pris effet. Les structures ayant un tel comportement sont isolées les unes des autres par le processus de mesure et l'interaction avec l'environnement assure l'irréversibilité. L'attribution de propriétés classiques est seulement comprise par rapport à leur valeur prédictive, comme elle doit l'être dans l'interprétation de Copenhague puisqu'elle assume ces propriétés comme limitées.
4. Le fait que nous observons toujours une actualité lors d'une mesure, plutôt qu'une superposition, ne peut pas être utilisé comme fait falsifiant la multiplicité d'actualités proposée par l'interprétation d'Everett car celle-ci prédit justement que chaque éventualité macroscopique évolue indépendamment des autres. Par contre, l'absence de phénomènes quantiques pour un système macroscopique suffisamment isolé serait, elle, une preuve suffisante falsifiant l'interprétation d'Everett (et la mécanique quantique actuelle) en faveur d'un macroréalisme. La recherche d'un tel échec du principe de superposition ou du principe d'enchevêtrement constitue un des objectifs que la physique se doit de promouvoir dans les années à venir.
5. Finalement, il ressort néanmoins qu'attribuer une réalité objective à la fonction d'onde (comme nouvel objet matériel et rien d'autre) serait un retour en arrière par rapport aux conceptions que nous avons avancées ici dans la compréhension du changement d'ontologie apporté par le parallélisme psycho-physique au chapitre 5. Car, pour arri-

ver à la nécessité d'un tel parallélisme, nous avons dû conclure qu'il manquait inévitablement un élément extérieur à la description physique lors de certaines situations, en particulier dans le contexte représentant une mesure.

Nous laisserons le soin au lecteur de conclure sur ces remarques. Nous voyons ici la nécessité d'une analyse extérieure dans tout formalisme mathématique décrivant la nature et dans toutes les interprétations de la mécanique quantique. L'interprétation de Copenhague et l'interprétation d'Everett apparaissent désormais sur un pied d'égalité où *l'actualité avec absence de cause* dans l'interprétation de Copenhague est traduite par une *causalité avec absence d'actualité* dans l'interprétation d'Everett. Il est assez bien reconnu que la causalité avec absence d'actualité revient à une actualité avec absence de cause relative à un observateur lorsque le processus d'observation est convenablement analysé. Cependant, ne serait-il pas plus logique que l'inverse soit aussi vrai ? Dans ce cas, l'interprétation de Copenhague ne se bornerait à ne décrire qu'un "monde" parmi tant d'autres que pour refléter notre limitation intrinsèque dans la connaissance de ce niveau de réalité. Plusieurs questions restent encore ouvertes.

Appendice A

Décohérence simple

Au chapitre 3, nous voulions évaluer l'effet de l'environnement sur un système S initialement dans un état $|\psi(t)\rangle$. Pour ce faire, nous assumons un couplage entre le système et les degrés de liberté de l'environnement de la forme $\mathcal{H}_{\text{int}} = -g\delta(t-t_i)\mathcal{X} \otimes \mathcal{A}$. Nous négligeons volontairement tout autre aspect de l'évolution en assumant que l'évolution temporelle de $S + E$ est simplement

$$|\Psi(t)\rangle = \exp\left(-\frac{i}{\hbar} \int_0^t \mathcal{H}_{\text{int}} dt\right) |\psi(0)\rangle \otimes |\epsilon(0)\rangle \quad (7.1)$$

ce que l'on simplifie pour

$$|\Psi(t)\rangle = \int dx \psi(x, 0) \exp\left(\frac{i}{\hbar} g \mathcal{X} \otimes \mathcal{A}\right) |x\rangle \otimes |\epsilon(0)\rangle \quad (7.2)$$

$$= \int dx \psi(x, 0) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \left(\frac{ig}{\hbar}\right)^n (\mathcal{X} \otimes \mathcal{A})^n |x\rangle \otimes |\epsilon(0)\rangle \quad (7.3)$$

$$= \int dx \psi(x, 0) |x\rangle \otimes \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \left(\frac{ig}{\hbar}\right)^n (x\mathcal{A})^n |\epsilon(0)\rangle \quad (7.4)$$

$$= \int dx \psi(x, 0) |x\rangle \otimes \exp\left(\frac{i}{\hbar} gx\mathcal{A}\right) |\epsilon(0)\rangle \quad (7.5)$$

Nous appelons $\mathcal{U}_x(t, 0)$ l'opérateur

$$\mathcal{U}_x(t, 0) = \exp\left(\frac{i}{\hbar} gx\mathcal{A}\right) \quad (7.6)$$

agissant uniquement sur le sous-espace de Hilbert correspondant aux degrés de liberté de l'environnement. Passons maintenant à la représentation de l'état en termes de l'opérateur

densité. On trouve que le système global $S + E$ doit être représenté par

$$\rho(t) = \iint dx dx' \psi^*(x', 0) \psi(x, 0) |x\rangle \langle x'| \otimes \mathcal{U}_x(t, 0) |\epsilon(0)\rangle \langle \epsilon(0)| \mathcal{U}_{x'}^\dagger(t, 0) \quad (7.7)$$

Prenant la trace partielle sur les degrés de liberté de l'environnement, on trouve

$$\rho_S(t) = \int dy \langle y | \rho(t) | y \rangle \quad (7.8)$$

$$= \iint dx dx' \psi^*(x', 0) \psi(x, 0) |x\rangle \langle x'| \langle \epsilon(0) | \mathcal{U}_{x'}^\dagger(t, 0) \mathcal{U}_x(t, 0) | \epsilon(0) \rangle \quad (7.9)$$

où les kets $|y\rangle$ forment une base dans l'espace de Hilbert de l'environnement. On se retrouve donc à devoir évaluer le coefficient

$$B(x, x') = \langle \epsilon(0) | \mathcal{U}_{x'}^\dagger(t, 0) \mathcal{U}_x(t, 0) | \epsilon(0) \rangle \quad (7.10)$$

Trivialement, $B(x, x) = 1$ car $\mathcal{U}_x(t, 0)$ est unitaire et le ket $|\epsilon(0)\rangle$ est normalisé. Intuitivement, lorsque $|x - x'| \gg 0$, $B(x, x')$ tendra vers 0 car cela représente une situation où les degrés de liberté de l'environnement diffusent sur des centres de masse très éloignés. De ce fait, la perturbation de l'environnement sera très différente selon qu'une particule est diffusée sur un centre de masse à telle ou telle position. Une perturbation très différente déplace l'état de l'environnement vers des zones très distinctes de l'espace d'états, se chevauchant peu ou pas du tout. Donc essentiellement,

$$B(x, x') \longrightarrow \delta(x - x') \quad (7.11)$$

Dans notre situation fictive, $\mathcal{U}_x(t, 0) = \exp\left(\frac{i}{\hbar} g x \mathcal{A}\right)$. Évaluons les éléments de matrice de $\mathcal{U}_{x'}^\dagger(t, 0) \mathcal{U}_x(t, 0)$ dans la base des vecteurs propres de \mathcal{A} . On obtient

$$\langle a | \mathcal{U}_{x'}^\dagger \mathcal{U}_x | a' \rangle = \langle a | \exp\left(\frac{-i}{\hbar} g x' \mathcal{A}^\dagger\right) \exp\left(\frac{i}{\hbar} g x \mathcal{A}\right) | a' \rangle \quad (7.12)$$

$$= \langle a | \exp\left(\frac{i}{\hbar} g [x - x'] \mathcal{A}\right) | a' \rangle \quad (7.13)$$

$$= \langle a | a' \rangle \exp\left(\frac{i}{\hbar} g [x - x'] a'\right) \quad (7.14)$$

Donc

$$B(x, x') = \iint da da' \langle \epsilon(0) | a \rangle \langle a | a' \rangle \exp \left(\frac{i}{\hbar} g a' [x - x'] \right) \langle a' | \epsilon(0) \rangle \quad (7.15)$$

$$= \int da \epsilon^*(a, 0) \epsilon(a, 0) \exp \left(\frac{i}{\hbar} g a [x - x'] \right) \quad (7.16)$$

Imaginons que l'état initial de l'environnement soit essentiellement un paquet d'ondes sur les degrés de liberté intervenant dans la corrélation. $\epsilon(a, 0) = \left(\frac{1}{\epsilon\sqrt{\pi}} \right)^{1/2} \exp \left(-\frac{a^2}{2\epsilon^2} \right)$ est un tel paquet d'ondes dans l'espace du paramètre a centré autour de 0¹. Dans ce cas, l'évaluation mène à

$$B(x, x') = \int da \left(\frac{1}{\epsilon\sqrt{\pi}} \right) \exp \left(-\frac{a^2}{\epsilon^2} \right) \exp \left(-\frac{i}{\hbar} g a [x' - x] \right) \quad (7.17)$$

$$\begin{aligned} &= \left(\frac{1}{\epsilon\sqrt{\pi}} \right) \exp \left(-\frac{\epsilon^2 g^2}{4\hbar^2} [x' - x]^2 \right) \int da \exp \left(-\frac{1}{\epsilon^2} \left(a + \frac{i\epsilon^2}{2\hbar} g [x' - x] \right)^2 \right) \\ &= \exp \left(-\frac{\epsilon^2 g^2}{4\hbar^2} [x' - x]^2 \right) \end{aligned} \quad (7.18)$$

Quelles sont les propriétés de ce coefficient ? La dépendance de la dispersion du paquet d'ondes des particules diffusées est telle que plus la dispersion est élevée, plus le coefficient de décohérence est fort. Une dispersion élevée des degrés de liberté de l'environnement signifie une très faible information quant à la position (classique) de ces degrés et donc, un environnement très aléatoire en principe. Il apparaît donc que l'interaction aléatoire est un aspect important du phénomène de la décohérence. Il se peut qu'une interaction seule soit insuffisante à définir uniquement la base de la position comme préférentielle parce que la "mesure" par l'environnement n'est pas parfaite. Cependant, la quantité de telles interactions qui intervient sur des temps encore assez courts est astronomique. La structure du produit tensoriel fait en sorte que chaque interaction du genre amène un facteur multiplicatif de 1 si $x = x'$ et nécessairement plus petit que 1 lorsque $x \neq x'$. Par conséquent, tout facteur de l'état global de l'état de la forme $|x\rangle\langle x'|$ se retrouve multiplié par de plus en plus de termes plus petits que 1 et d'autant plus que $|x - x'| \ll 1$. Leur coefficient multiplicatif tend donc vers 0 exponentiellement [30, p. 65].

Donc pour revenir à l'opérateur densité, nous avons trouvé que la représentation locale

¹Éventuellement, il serait sans doute plus réaliste de considérer l'environnement dans un état correspondant à une distribution de Boltzmann des états d'énergie.

de l'état du système S est

$$\rho_S(t) = \iint dx dx' B(x, x') \psi^*(x', 0) \psi(x, 0) |x\rangle \langle x'| \rightarrow \int dx P_{\psi(0)}(x) |x\rangle \langle x| \quad (7.19)$$

Ceci confirme notre hypothèse.

Appendice B

Pourquoi ne pas croire à l'interprétation statistique ?

Tout au long de ce travail, nous avons implicitement assumé que le vecteur d'état ou la fonction d'onde était une propriété attribuable à un système isolé. Plusieurs paradoxes émergent de ce fait car lorsqu'on transpose la mécanique quantique aux systèmes macroscopiques, ceux-ci se présentent rarement en plusieurs exemplaires et les statistiques y sont alors les plus troublantes. Cependant, l'interprétation statistique rejette la description de système quantique unique, prétendant que l'état représente un ensemble de systèmes similairement préparés. Du même coup, l'interprétation statistique rejette l'applicabilité universelle de la MQ : la MQ est applicable seulement aux objets microscopiques, peu importe ce que cela veut dire. Il est vrai, d'un côté, que plusieurs résultats déterministes fournis par la MQ sont des résultats sur le comportement d'un ensemble de particules (p. ex. un patron d'interférence) et que de tels résultats sont confirmés par des mesures effectuées sur un très grand nombre de systèmes similaires. Donc, assumons que l'état quantique soit effectivement muet quant au devenir d'un objet microscopique unique. Il n'en demeure pas moins que la MQ fait aussi des prédictions déterministes sur ce genre d'objet isolé et que ces prédictions sont aussi vérifiées que les résultats statistiques. Par exemple, la MQ prédit que les niveaux d'énergie de cet objet sont quantifiés et les détecteurs modernes sont assez sensibles pour détecter un seul photon lors d'une transition entre deux de ces niveaux. Aucune statistique n'intervient ici si ce n'est que nous ne pouvons prédire quand exactement un état excité émettra, ce qui n'intervient pas dans l'argument. Le point est qu'un système unique "a" les propriétés objectives prédites par la MQ. Si l'état Ψ représente seulement l'état d'un ensemble, nous ne pouvons pas comprendre la quantification de l'énergie d'un objet unique donnée par les conditions au frontière d'une telle solution Ψ d'une équation différentielle décrivant supposément l'évolution déterministe de tels ensembles. Deuxièmement, on peut toujours filtrer des ensembles, obtenant ainsi un ensemble réduit possédant certaines propriétés n'ayant pas été "filtrées". Mais qu'arrive-t-il, dans une situation initiale où un ensemble préparé dans l'état Ψ passe au travers d'un filtre qui sélectionne la pro-

priété correspondant à l'état ϕ , lorsqu'on laisse seulement le temps à un objet de passer le filtre ? Cet objet est-il dans l'état ϕ après son passage ? De toute évidence, ce n'est pas un ensemble statistique. Ce sont des raisons, parmi d'autres, qui nous forcent à considérer la mécanique quantique comme valide dans la représentation d'objet unique.

Bibliographie

- [1] Y. AHARONOV et L. VAIDMAN : About Position Measurements Which do not Show the Bohmian Particule Position. *Dans* J. T. CUSHING, A. FINE et S. GOLDSTEIN, éditeurs : *Bohmian Mechanics and Quantum Theory : An Appraisal*, pages 141–154. Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [2] D. ALBERT et B. LOEWER : Interpreting the Many Worlds Interpretation. *Synthese*, 77:195–213, 1988.
- [3] A. ASPECT, J. DALIBARD et G. ROGER : Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzer. *Physical Review Letters*, 49(25):1804–7, 1982.
- [4] A. ASPECT, P. GRANGIER et G. ROGER : Experimental Tests of Realistic Local Theories via Bell's Theorem. *Physical Review Letters*, 47(7):460–3, 1981.
- [5] J. S. BELL : *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*. Cambridge University Press, 2ième édition, 2004.
- [6] G. BERKELEY : *Principes de la connaissance humaine*. GF-Flammarion, 1991.
- [7] D. BOHM : A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of 'Hidden' Variables I & II. *Physical Review*, 85(2):166–89, 1952.
- [8] D. BOHM : *The Special Theory of Relativity*. Routledge Classics, 1996.
- [9] N. BOHR : Quantum Mechanics and Physical Reality. *Nature*, 136:65, 1935.
- [10] N. BOHR : Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics. *Dans* P. A. SCHILPP, éditeur : *Albert Einstein : Philosopher-Scientist*, pages 201–41. Open Court Publishing Company, 3ième édition, 1970.
- [11] N. BOHR : Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete ? *Dans* J. A. WHEELER et W. H. ZUREK, éditeurs : *Quantum Theory and Measurement*, pages 145–51. Princeton University Press, 1983.
- [12] M. BORN, éditeur. *The Correspondance Between Albert Einstein and Max and Hedwig Born, 1916-1955*. Walker and Company, 1971.

- [13] H. R. BROWN et D. WALLACE : Solving the Measurement Problem : De Broglie-Bohm Loses out to Everett. *Foundations of Physics*, 35(4):517–40, 2005.
- [14] J. BUB : *Interpreting the Quantum World*. Cambridge University Press, 1997.
- [15] B. D’ESPAGNAT : *Veiled Reality : An Analysis of Present-Day Quantum Mechanical Concepts*. Addison-Wesley Publishing Compagny, 1995.
- [16] D. DEUTSCH : Quantum Theory as a Universal Physical Theory. *International Journal of Theoretical Physics*, 24(1):1–41, 1985.
- [17] B. DEWITT et N. GRAHAM : *The Many-World Interpretation of Quantum Mechanics*. Princeton University Press, 1973.
- [18] B. S. DEWITT : Quantum Mechanics and Reality. *Physics Today*, 23(9):30–5, 1970.
- [19] A. EINSTEIN : Quantum Mechanics and Reality. *Dialectica*, 2:320–4, 1948.
- [20] A. EINSTEIN, B. PODOLSKY et N. ROSEN : Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete ? *Physical Review*, 47:777–80, 1935.
- [21] B.-G. ENGLERT, M. O. SCULLY, G. SÜSSMANN et H. WALTHER : Surrealistic Bohm Trajectories. *Zeitschrift für Naturforschung*, 47a:1175–86, 1993.
- [22] H. EVERETT : ‘Relative State’ Formulation of Quantum Mechanics. *Review of Modern Physics*, 29(3):454–62, 1957.
- [23] F. FLORES : The Equivalence of Mass and Energy. Dans E. N. ZALTO, éditeur : *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. 2004. URL = <http://plato.stanford.edu/entries-/equivME/#3.1>.
- [24] G. C. GHIRARDI, A. RIMINI et T. WEBER : Unified Dynamics for Microscopic and Macroscopic Systems. *Physical Review D*, 34(2):470–91, 1986.
- [25] D. GIULINI, E. JOOS, C. KIEFFER, J. KUPSCH, I.-O. STAMATESCU et H. D. ZEH : *Decoherence and the Appearance of a Classical World in Quantum Theory*. Springer, 1996.
- [26] W. HEISENBERG : *Philosophical Problems of Quantum Physics*. Ox Bow Press, 1979.
- [27] W. HEISENBERG : The Physical Content of Quantum Kinematics and Mechanics. Dans J. A. WHEELER et W. H. ZUREK, éditeurs : *Quantum Theory and Measurement*, pages 62–84. Princeton University Press, 1983.
- [28] D. R. HOFSTADTER : *Gödel, Escher, Bach : an Eternal Golden Braid*. Basic Books, 1999.

- [29] P. R. HOLLAND : *The Quantum Theory of Motion : An Account of the De Broglie-Bohm Causal Interpretation of Quantum Mechanics*. Cambridge University Press, 1993.
- [30] E. JOOS, H. D. ZEH, C. KIEFFER, D. GIULINI, J. KUPSCH et I.-O. STAMATESCU : *Decoherence and the Appearance of a Classical World in Quantum Theory*. Springer, 2ième édition, 2003.
- [31] A. KENT : Against Many Worlds Interpretations. *arXiv :quant-ph/9703089 v1*, 1997.
- [32] A. J. LEGGETT : Testing the Limits of Quantum Mechanics : Motivation, State of Play, Prospects. *Journal of Physics : Condensed Matter*, 14:R415–R451, 2002.
- [33] L. MARCHILDON : *Mécanique quantique*. De Boeck Université, 2000.
- [34] H. MARGENAU : Einstein's Conception of Reality. Dans P. A. SCHILPP, éditeur : *Albert Einstein : Philosopher-Scientist*, pages 245–68. Open Court Publishing Company, 3ième édition, 1970.
- [35] R. PENROSE : *The Emperor's New Mind : Concerning Computers, Minds and the Laws of Physics*. Oxford University Press, 1989.
- [36] R. PENROSE et C. J. ISHAM, éditeurs. *Quantum Concepts in Space and Time*. Oxford Science publications, 1986.
- [37] S. SAUNDERS : Time, Quantum Mechanics, and Decoherence. *Synthese*, 102:235–66, 1995.
- [38] S. SAUNDERS : Time, Quantum Mechanics, and Tense. *Synthese*, 107:19–53, 1996.
- [39] M. SCHLOSSHAUER : Decoherence, the Measurement Problem, and Interpretations of Quantum Mechanics. *arXiv :quant-ph/0312059 v4*, 2003.
- [40] M. O. SCULLY : Do Bohm Trajectories Always Provide a Trustworthy Physical Picture of Particle Motion ? *Physica Scripta*, T76:41–6, 1998.
- [41] M. SMERLAK et C. ROVELLI : Relational EPR. *arXiv :quant-ph/0604064 v1*, 2006.
- [42] E. J. SQUIRES : Many Views of One World - an Interpretation of Quantum Theory. *European Journal of Physics*, 6:171–3, 1987.
- [43] H. P. STAPP : The Copenhagen Interpretation. *American Journal of Physics*, 40:1098–116, août 1972.
- [44] L. VAIDMAN : On Schizophrenic Experiences of the Neutron or Why we Should Believe in the Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics. *arXiv :quant-ph/9609006 v1*, 1996.

- [45] L. VAIDMAN : The Reality in Bohmian Mechanics or Can You Kill with an Empty Wave Bullet ? *Foundations of Physics*, 35(2), 2005.
- [46] J. von NEUMANN : *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*. Princeton University Press, 1955.
- [47] D. WALLACE : Worlds in the Everett Interpretation. *arXiv :quant-ph/0103092 v1*, pages 1–24, 2001.
- [48] D. WALLACE : Everett and Structure. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 34:87–105, 2003.
- [49] H. D. ZEH : Toward a Quantum Theory of Observation. *Foundations of Physics*, 3(1):109–16, 1972.
- [50] H. D. ZEH : There are no Quantum Jumps, nor are There Particles ! *Physical Letters A*, 172:189–92, 1993.
- [51] A. ZEILINGER : Testing Quantum Superposition with Cold Neutrons. Dans R. PENROSE et C. J. ISHAM, éditeurs : *Quantum Concepts in Space and Time*. Oxford science publication, 1986.
- [52] W. ZUREK : Decoherence and the Transition from Quantum to Classical. *Physics Today*, 44(10):36–44, 1991.
- [53] W. H. ZUREK : Negotiating the Tricky Border Between Quantum and Classical. *Physics Today*, 46(4):13–5 & 81–90, 1993.